

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Meranie teplotného gradientu systémom DTS v atmosférickom  
laboratórnom boxe**

**Measurement of the Temperature Gradient in Atmospheric  
Laboratory Box whith Using Distribution Temperature System**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Juraj Cyprich**

Studijní program: **B2647 Informační a komunikační technologie**

Studijní obor: **2601R013 Telekomunikační technika**

Téma: **Měření teplotního gradientu systémem DTS v atmosférickém laboratorním boxu**  
**Measurement of the Temperature Gradient in Atmospheric Laboratory Box with Using Distribution Temperature System**

Jazyk vypracování: **čeština**

### Zásady pro vypracování:

DTS systém je jednoduchou a velice přesnou aplikací senzorického systému, jež je schopen měřit teplotu za pomoci mnoho-vidového optického vlákna s rozlišením 0,01°C. Cílem práce je vytvoření sítě optických meandrů uvnitř laboratorního boxu a pomocí DTS systému měřit teplotu v jednotlivých místech boxu. Následně řešitel vytvoří aplikaci v softwaru MATLAB, která bude schopná zaznamenávat data z DTS zobrazovat je v podobě 2D a 3D grafů pro další možnosti vyhodnocení. Řešení práce spočívá ve splnění následujících bodů:

1. Teoreticky popište funkci DTS systému a jeho aplikace.
2. Aplikujte DTS systém v rámci měření distribuce teploty vzduchu na vnitřních stěnách simulačního boxu.
3. Vytvořte aplikaci v systému MATLAB pro vyhodnocení výsledků měření v reálném čase a zobrazení v 2D a 3D grafech.
4. Vyhodnoťte a popište naměřené výsledky pro zadané konfigurace vstupních a vstupních podmínek dle vedoucího práce.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] LONG, D. A. : The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules., 2002, 650 p., ISBN: 978-0-471-49028-9
- [2] KOUDELKA, PETR; PETRŮJOVÁ, BOHUMILA; LÁTAL, JAN, et al. Optical Fiber Distributed Sensing System Applied in Cement Concrete Commixture Research. Radioengineering. Radioengineering. 2010, Vol. 19, Issue 1, s. 172-177. Available at WWW: <[http://www.radioeng.cz/fulltexts/2010/10\\_01\\_172\\_177.pdf](http://www.radioeng.cz/fulltexts/2010/10_01_172_177.pdf)>. ISSN 1210-2512.
- [3] ANDREWS, L., C.; PHILLIPS, R. L.; HOPEN, C., Y.; Theory of optical scintillation. Journal of the Optical Society of America A. 1999, Vol. 16, No. 6, p. 1417 – 1429. ISSN 0740-3232.
- [4] MAJMUDAR, A., K.; RICKLIN, J., C.; Free-space laser communications: principles and advances. New York: Springer, 2008, p. 417. ISBN 978-0-387-28652-5.
- [5] WILFERT, O. Optoelektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prehlásenie študenta**

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne  
pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 28. apríla 2016

  
.....  
podpis študenta

## **Pod'akovanie**

Týmto chcem vysloviť poďakovanie Ing. Lukáši Hájkovi, za pomoc, užitočné rady, pripomienky, za ochotu, venovaný čas a pomoc pri získavaní potrebných informácií pri vypracovaní mojej bakalárskej práce.

## **Abstrakt**

Bakalárska práca sa zaoberá meraním teploty pomocou senzorického systému DTS. V teoretickej časti sú popísané distribuované optické senzory. V ďalšej časti sú popísané rozptyly svetla vo vláknach ako Rayleighov rozptyl alebo Ramanov rozptyl a jeho Stokes a anti-Stokes časť. Praktická časť je rozdelená do troch častí. Prvá je zameraná na vytvorenie aplikácie v programovacom prostredí MATLAB, ktorá spracováva namerané výsledky v reálnom čase. Druhá sa zameriava na výrobu dvoch meracích sietí. V poslednej praktickej časti sú popísané merania na vytvorených sieťach ako aj zhodnotenie výsledkov meraní.

## **Kľúčové slová:**

Vláknové optické senzory, DTS systém, Ramanov rozptyl, Stokes časť, anti-Stokes časť, MATLAB

## **Abstract**

Bachelor thesis focuses on temperature measuring using a DTS sensor system. The theoretical part describes distributed optical sensors. The next section describes the scattering of the light in optical fibers as Rayleigh scattering or Raman scattering and his Stokes and anti-Stokes parts. The practical part is divided into three parts. The first one is focused on creating applications in MATLAB development environment that processes measured results in real-time. The second one focuses on the production of two measurement networks. The last chapter describes practical measurements for networking as well as evaluation of the measurement result.

## **Keywords:**

Fiber optic sensors, DTS systems, Raman scattering, Stokes part, anti-Stokes part, MATLAB

# Obsah

Zoznam použitých symbolov .....	- 9 -
Zoznam použitých skratiek .....	- 10 -
Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek .....	- 11 -
Úvod .....	- 12 -
1    Senzorické vláknové systémy .....	- 13 -
1.1    Obecné rozdelenie VOS .....	- 14 -
1.1.1    Intrinsické VOS .....	- 14 -
1.1.2    Extrinsické VOS .....	- 15 -
1.2    Ďalšie delenie VOS .....	- 15 -
1.2.1    Podľa meranej veličiny: .....	- 15 -
1.2.2    Podľa druhu použitej modulácie: .....	- 15 -
1.2.3    Podľa konštrukcie a koncepcie VOS: .....	- 15 -
2    Distribuované optické senzory .....	- 16 -
2.1    Základné rozdelenie .....	- 16 -
2.1.1    Intrinsické distribuované senzory .....	- 16 -
2.1.2    Kvázi distribuované senzory .....	- 17 -
2.2    OTDR .....	- 18 -
2.3    DTS .....	- 20 -
2.3.1    Princíp DTS systémov .....	- 21 -
2.3.2    Použitie DTS systémov .....	- 21 -
3    Rozptyl svetla vo vláknach .....	- 22 -
3.1    Rayleighov rozptyl .....	- 22 -
3.2    Mieov rozptyl .....	- 24 -
3.3    Brillouinov rozptyl .....	- 24 -
3.4    Ramanov rozptyl .....	- 25 -
3.4.1    Stokes a anti-Stokes časť Rahmanového rozptylu .....	- 28 -
4    Aplikácia v programe MATLAB .....	- 30 -
4.1    Popis aplikácie .....	- 30 -
4.1.1    Prvé okno aplikácie .....	- 30 -
4.1.2    Druhé okno aplikácie .....	- 35 -
4.2    Sieťové spojenie s DTS systémom .....	- 39 -

5	Konštrukcia sietí z optických vlákien .....	- 40 -
5.1	Postup prípravy sietí.....	- 40 -
5.2	Meranie sietí OTDR.....	- 42 -
5.2.1	Sekundárna sieť .....	- 42 -
5.2.2	Primárna sieť .....	- 43 -
6	Kalibrácia sietí.....	- 45 -
6.1	Popis kalibrácie pre siete.....	- 46 -
6.2	Kontrola kalibrácie.....	- 48 -
7	Výsledky meraní .....	- 51 -
7.1	Meranie za pomoci ohrievača Solac TH 8325 .....	- 51 -
7.2	Meranie pomocou ohrievača Empire CTH-5000.....	- 55 -
7.3	Meranie s atmosférickým boxom.....	- 59 -
	Záver .....	- 69 -
	Použitá literatúra .....	- 70 -
	Zoznam príloh. ....	- 71 -



## Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\lambda$	m	Vlnová dĺžka
$\omega$	Hz	Kruhová frekvencia
$\theta$	°	Rozptylový uhol
$\hbar$	J*s	Diracova konštanta
$\mu$	C*m	Dipólový moment
$\alpha$	cm <sup>2</sup> *V <sup>-1</sup>	Polarizabilita
$A_e$	μm	Prierez jadra vlákna
$\alpha$	dB	Straty vo vlákne
$c$	m/s	Rýchlosť svetla
$d$	cm	Priemer
$g$	dB	Faktor zosilnenia
$I_0$	lx	Intenzita svetla
$K$	J*K <sup>-1</sup>	Boltzmanova konštanta
$L$	km	Dĺžka optického vlákna
$N$	-	Index lomu
$P(0)$	W	Výkon čerpacej vlny
$P_F$	W	Výkon signálu
$r$	cm	Polomer
$R$	m	Vzdialenosť od častice
$\nu_{vib}$	-	Vibračná frekvencia
$\nu_0$	-	Frekvencia dopadajúceho žiarenia

---

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
<b>APD</b>	Lavínová fotodióda
<b>BMP</b>	Windows Bitmap
<b>CM</b>	Coherence Multiplex
<b>DTS</b>	Distribution Temperature System
<b>EPS</b>	Encapsulated PostScript
<b>FDM</b>	Frequency Division Multiplexing
<b>JPG</b>	JPEG Image
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode
<b>MATLAB</b>	Matrix Laboratory
<b>OTDR</b>	Optical Time-Domain Reflectometer
<b>PET</b>	Poly Ethylén Tereftalát
<b>PIN</b>	Fotodióda
<b>P-OTDR</b>	Polarization-Optical Time Domain Reflectometry
<b>PNG</b>	Portable Network Graphics
<b>SVG</b>	Scalable Vector Graphics
<b>TDM</b>	Time Division Multilex
<b>TIF</b>	Tag Image File Format
<b>VVN</b>	Káble veľmi vysokého napätia
<b>VOS</b>	Vláknový optický senzor
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing

## Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek

Číslo ilustrácie	Názov ilustrácie	Číslo stránky
1.1	Základná bloková schéma	13
1.2	Schéma intrinzné VOS	14
1.3	Schéma extrinzné VOS	15
2.1	Intrisický distribuovaný senzor	16
2.2	Kvázi distribuovaný senzor	17
2.3	Základná bloková schéma OTDR	18
2.4	Princíp fungovania OTDR	19
2.5	Základná bloková schéma DTS	21
3.1	Zložky rozptýleného svetla	22
3.2	Rayleighov rozptyl	23
3.3	Mieov rozptyl	24
3.4	Stokes časť Ramanovho rozptylu	28
3.5	Anti-Stokes časť Ramanovho rozptylu	29
<hr/>		
Číslo tabuľky	Názov tabuľky	Číslo stránky
5.1	Katalógové parametre optických vlákien	40
5.2	Hodnoty namerané ODTR (sekundár)	42
5.3	Hodnoty namerané ODTR (primár)	43
7.1	Parametre predradného vlákna	51

## Úvod

Optické vlákno sa vďaka vývoju a zdokonaleniu výroby v posledných dvoch desaťročiach nevyužíva len na prenos dát v komunikáciách ale čím ďalej viac aj na snímanie rôznych fyzikálnych veličín. Čiže sa využíva aj ako optický vláknový senzor. Optické vláknové senzory v posledných rokoch zažívajú veľký rozmach a využitie v mnohých oblastiach. Najmä vďaka svojim výhodám ako sú malé rozmery, odolnosť voči elektromagnetickému žiareniu, linearita a mnoho ďalších. Dnes neexistuje fyzikálna veličina, ktorú by nimi nebolo možné zmerať. Preto sa využívajú pre snímanie teploty, tlaku, vlhkosti alebo mechanického poškodenia a mnoho ďalších fyzikálnych vlastností.

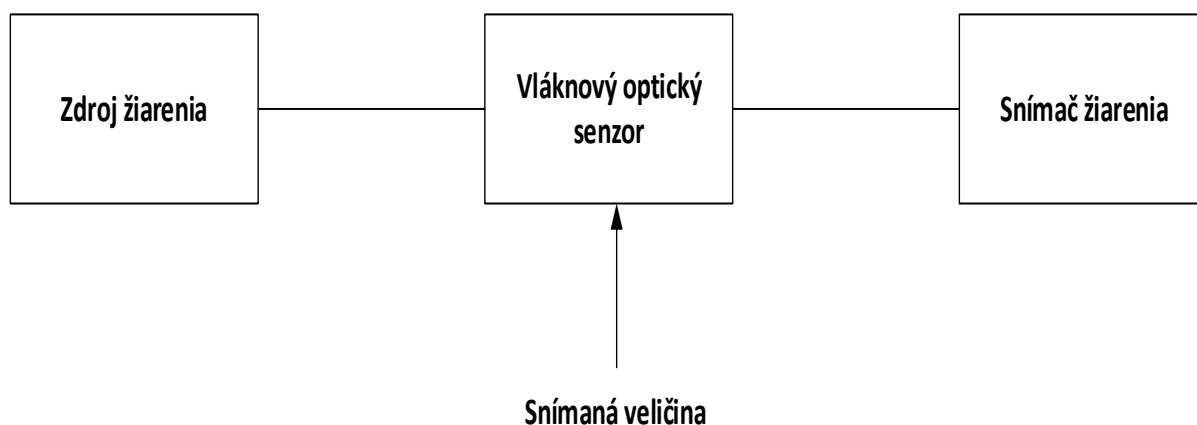
Táto práca je venovaná meraniu teploty pomocou optických vlákien. Pre meranie teploty je využívaný senzorický systém DTS. Pre snímanie meranej veličiny využívajú DTS systémy mnoho vidové optické vlákna. Tieto senzorické systémy sú založené na princípe analýzy spätného odrazu svetla v optickom vlákne. Konkrétne je pre snímanie teploty analyzovaný Ramanov rozptyl. Kde sa na určenie teploty využíva jeho Stokes a anti-Stokes časť.

Pre vyhodnocovanie meraní, ktoré boli zadane vedúcim práce bola vytvorená aplikácia v programovacom prostredí MATLAB. Aplikácia vyhodnocuje namerané dáta a vykresľuje ich pomocou 2D a 3D grafov. Pri vytvorení aplikácie sa hlavný dôraz kládol na to aby aplikácia dokázala komunikovať s DTS zariadením a vyhodnocovala namerané dáta v reálnom čase.

# 1 Senzorické vláknové systémy

Optické vláknové systémy sa vzhľadom na svoje vlastnosti používajú v poslednom čase nielen v komunikačnej technike, ale aj v iných oblastiach ako napr. spracovanie signálov ale najmä na konštrukciu optických vláknových senzorov.

Výrazne k tomu dopomohlo skvalitnenie technologických postupov pri výrobe optických vlákien v posledných dvoch desaťročiach. Čo umožnilo vyrábať okrem klasických vlákien aj vlákna s veľmi špecifickými vlastnosťami. Vďaka tomuto intenzívnemu výskumu máme dnes na výber z množstva snímacích techník senzorov a ich konfigurácii. Rôznorodosť optiky v tomto smere potvrdzuje aj fakt že napríklad teplota ako fyzikálna veličina, môže byť meraná viac ako osemnástimi úplne odlišnými metódami. To umožňuje konkrétny senzor navrhnúť s rozdielnym rozlíšením, presnosťou či dosahom. Toto všetko vedie k stále väčšiemu nasadzovaniu optických vlákien v oblasti senzoriky a meracej techniky. Senzorové systémy používajúce optické vlákna nazývame optické vláknové systémy. [1]



Obrázok 1.1: Základná bloková schéma. [1]

Vláknový optický senzor sa skladá z optického vlákna, ktoré je už z princípu alebo zámernou úpravou citlivé na veličinu ktorú, chceme snímať. V klude môžeme povedať, že dnes neexistuje fyzikálna veličina, ktorú by nimi nebolo možné zmerať.

Použitie vláknových optických senzorov je v niektorých aplikáciách nenahradiťelné (hydrofony a gyroskopy), pretože aj tie najlepšie klasické senzory nedosahujú také vynikajúce výsledky meraných veličín. Vyplýva to z úplne odlišného fyzikálneho charakteru nosiča informácií. Vláknové optické senzory môžu nájsť uplatnenie ako senzory pre snímanie tlaku, teploty, vlhkosti, rotácie, vibrácií, deformácií, mechanického poškodenia, chemických a biomedicínskych vlastností.

Výhody týchto senzorov sú ich veľmi malé rozmery, nízka hmotnosť, linearita, nevedú elektrický prúd, sú odolné voči nepriaznivým poveternostným vplyvom, sú vysoko citlivé, možnosť vzdialeného monitorovania a taktiež možnosť monitorovať viacero podnetov naraz ako mechanické namáhanie, tlak, teplota, zvuk. Hlavnou výhodou je odolnosť proti elektromagnetickému rušeniu.

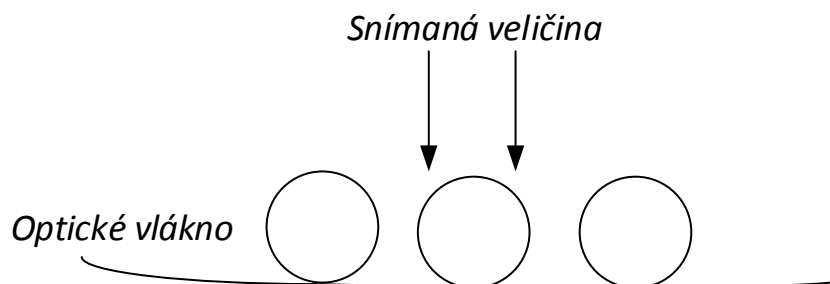
Vďaka týmto vlastnostiam môžu byť využívané napríklad v prostredí s vysokým napätím ďalej môžu byť bezpečne využívané vo výbušnom prostredí keďže nehrozí nebezpečenstvo vzniku iskier a to ani pri poškodení. Medzi hlavné nevýhody patrí vyššia cena, ktorá je však spätne vyvážená skvalitnením výstupných signálov ale taktiež aj určitý konzervatívny prístup používateľov meracej techniky. [2],[3]

Princíp optických vláknových senzorov je že na vstupe majú zdroj optického žiarenia (LEDdióda, polovodičový laser), ktorý vyžaruje spojitý alebo impulzový optický signál do optického vlákna. Na výstupe senzora je fotodetektor (dióda PIN , lavínová fotodióda APD), ktorý prijíma senzorom modulovaný optický signál. Aktívnou súčasťou senzora sú elektronické prvky a obvody riadenie zdroja, fotodetektora a na spracovanie detekovaného signálu. Samotný snímací prvok je elektrický pasívny, pripája sa jedným alebo viacerými optickými vláknami k zdroju a detektoru svetla. Podstatou senzora je snímanou veličinou vyvolaný fyzikálny (optický) jav, pôsobiaci medzi zdrojom a detektorom svetla, ktorý spôsobuje zmenu (moduláciu) prenášaného optického signálu zodpovedajúcu snímanej veličine. Optické vláknové senzory možno rozdeliť do skupín podľa rôznych hľadísk: snímanej veličiny, použitého optického vlákna, optickej konštrukcie, modulácie optického signálu. [4]

## 1.1 Obecné rozdelenie VOS

### 1.1.1 Intrinsické VOS

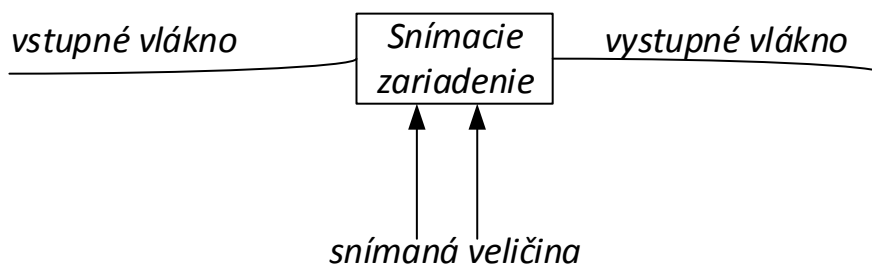
Senzory, v ktorých sa optické vlákno používa ako citlivý prvok (snímací prvok) -vlastné optické senzory. Využíva sa vplyv snímanej veličiny na prenosové vlastnosti optického vlákna, pričom sa mení intenzita, frekvencia, fáza, polarizačný stav atď. prenášaného optického signálu. [5]



Obrázok 1.2: Schéma intrinsického VOS. [5]

### 1.1.2 Extrinsické VOS

Senzory, ktoré používajú optické vlákna iba k prenosu žiarenia od zdroja žiarenia k miestu pôsobenia meranej veličiny a odtiaľ ku snímaču zariadenia. Tu je do vlákna vložený prvok, ktorý moduluje optický signál, ktorý cez neho prechádza. Do tejto skupiny senzorov možno pri určitom zovšeobecnení zaradiť aj rôzne meracie prístroje, v ktorých optické vlákna umožňujú meranie vzdialenosti, rýchlosti, a pod. na ťažko prístupných miestach. [5]



Obrázok 1.3: Schéma extrinsického VOS. [5]

## 1.2 Ďalšie delenie VOS

Vláknové optické senzory majú veľmi široký záber použitia. Preto majú aj množstvo delení napr. podľa meranej veličiny, druhu použitej modulácie alebo konštrukcie a koncepcie. A mnoho ďalších delení. [6]

### 1.2.1 Podľa meranej veličiny:

- Mechanické,
- Elektrické,
- Magnetické,
- Tepelné,
- Chemické,
- Biologické.

### 1.2.2 Podľa druhu použitej modulácie:

- Amplitúdové,
- Fázové,
- Polarizačné,
- Vlnovej dĺžky.

### 1.2.3 Podľa konštrukcie a koncepcie VOS:

- Cele vláknové,
- Distribuované,
- Kvázi distribuované,
- Bodové.

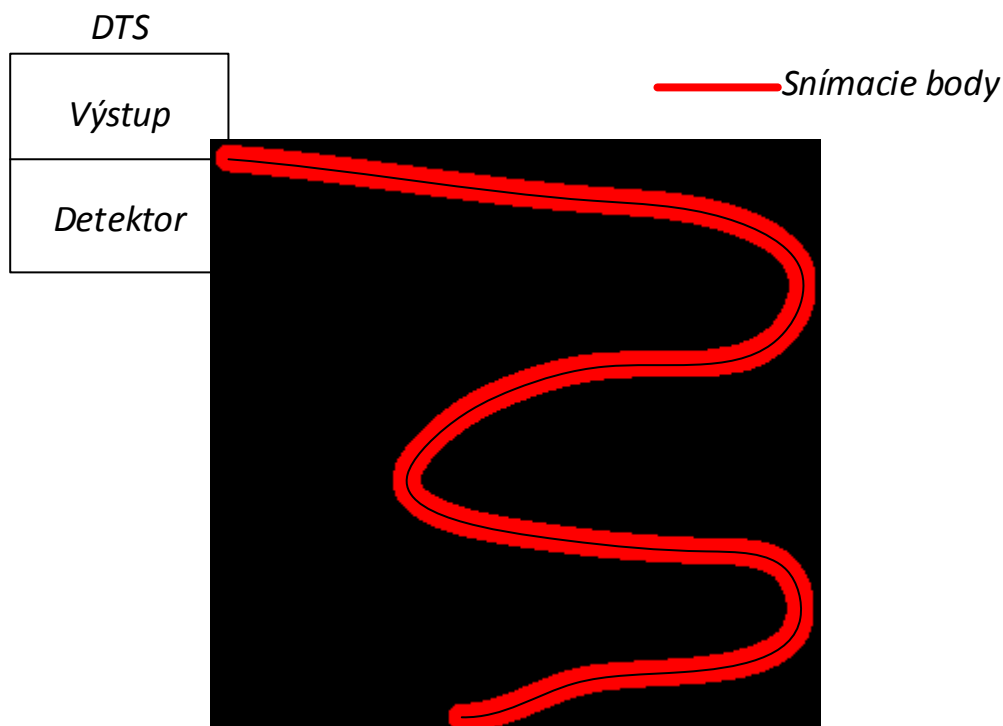
## 2 Distribúované optické senzory

Distribúované optické senzory prešli v poslednom desaťročí veľkým vývojom, práve kvôli ich nespochybniteľným výhodám oproti konvenčným senzorom. Z hľadiska uskutočňovania merania na vlákne rozlišujeme intrinsické distribúované a kvázi-distribúované senzory. V prípade intrinsických distribúovaných senzorov sa meranie uskutočňuje pozdĺž celého vlákna, zatiaľ čo pri kvázi-distribúovaných sa monitorovanie uskutočňuje v diskretných úsekoch vlákna. Týmto názvom tiež pomenúvame nevláknové optické senzory. [7]

### 2.1 Základné rozdelenie

#### 2.1.1 Intrinsické distribúované senzory

Nachádzajú najviac uplatnenie v systémoch, kde sa vyžaduje meranie veľkého množstva bodov alebo meranie pozdĺž celého vlákna, ako napríklad monitorovanie štrukturálnej integrity budov, mostov, monitorovanie teploty vo výkonových transformátoroch, generátoroch, reaktoroch či v požiarnych systémoch ďalej na detekciu poškodenia potrubia alebo použitie v kompozitných materiáloch, na sledovanie v reálnom čase mechanického namáhania, vibrácií a teploty, špeciálne v leteckom či kozmickom priemysle. [1]

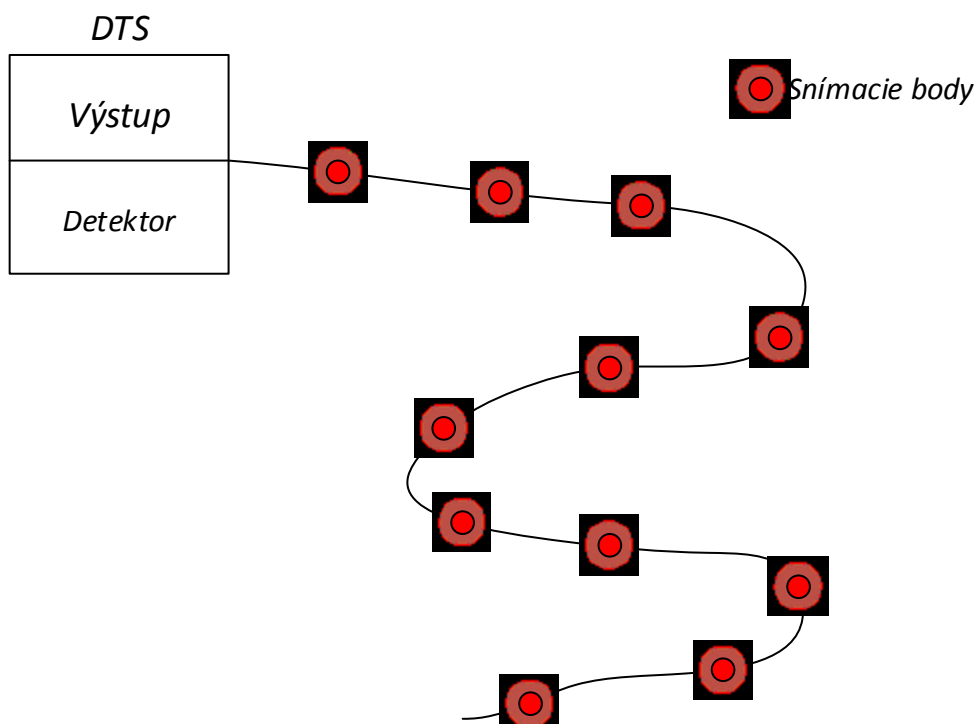


Obrázok 1.4: *Intrinsický distribúovaný senzor.*



### 2.1.2 Kvázi distribuované senzory

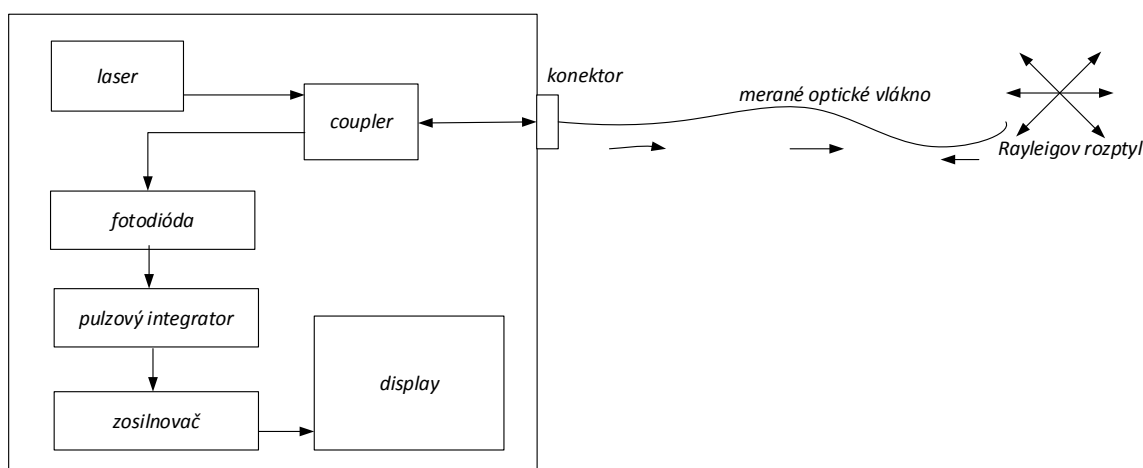
Môžeme tiež použiť v monitorovaní jedného fyzikálneho javu, ale častejšie ich využívame pre schopnosť monitorovať viacero fyzikálnych javov naraz. To môžeme dosiahnuť buď klasickým časovým multiplexom TDM (Time Division Multiplexing) respektíve frekvenčným FDM (Frequency Division Multiplexing) alebo použitím princípu, ktorý je používaný v komunikačných optických vláknach vlnový multiplex WDM (Wavelength Division Multiplexing), či koherentný multiplex CM (Coherence Multiplex), prípadne ich kombináciou. Aplikácia týchto senzorov má podobne široké možnosti použitia. [1]



Obrázok 1.5: Kvázi distribuovaný senzor.

## 2.2 OTDR

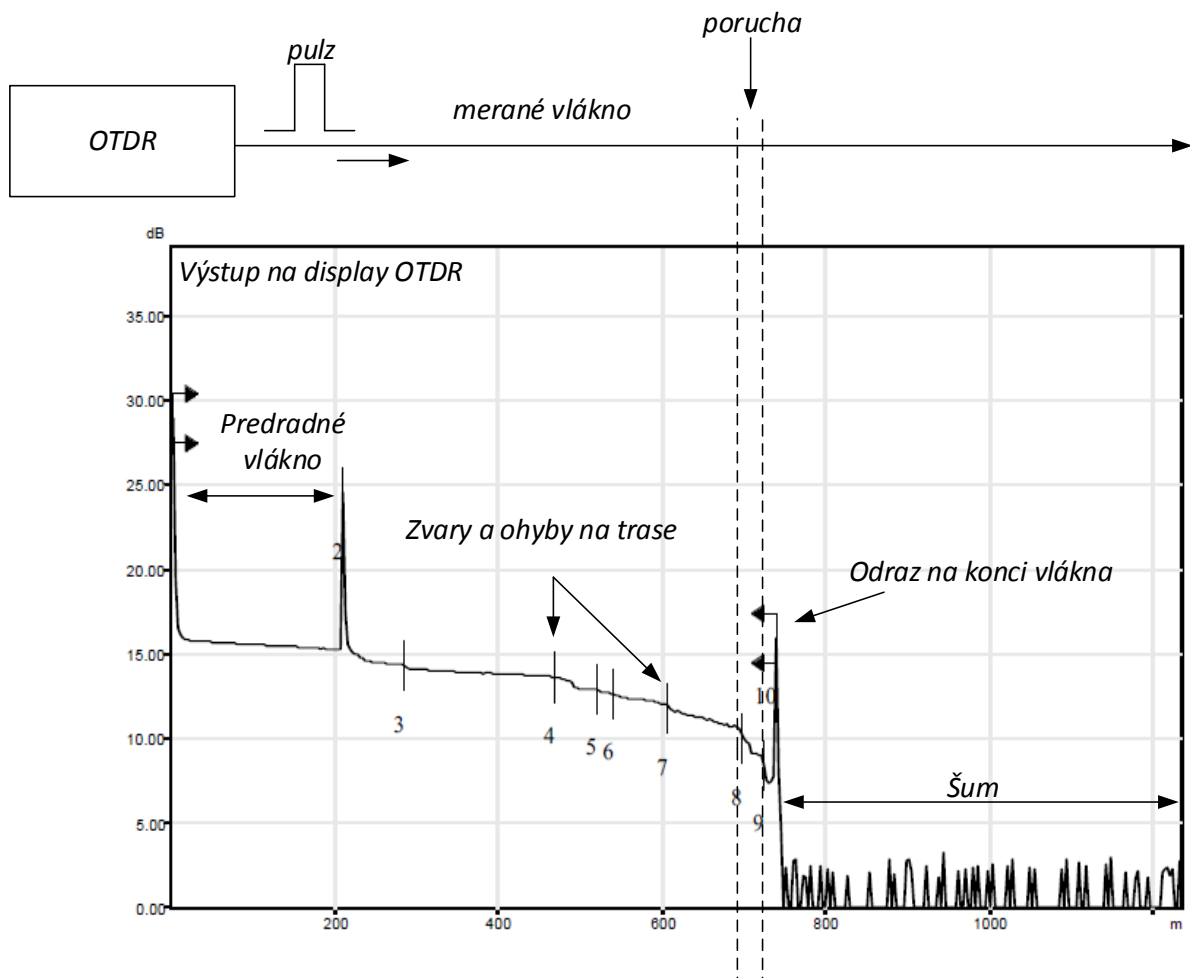
Intrínické distribuované senzory sú typický založené na stratových alebo odrazových mechanizmoch v optickom vlákne, ktoré tvoria predĺžený senzor. Prvý intrínický distribuovaný senzor bol založený na jednej variante OTDR a to P-OTDR (Polarization-Optical Time Domain Reflectometry), v ktorej miera polarizácie Rayleighovho rozptýleného svetla v jedno vidovom vlákne bola detekovaná ako funkcia času. Jedná z výhod OTDR je tá, že stačí mať prístup k jednému koncu vlákna, z ktorého je vysielaný pulzujúci svetelný lúč a na tom istom konci zachytávame odrazenú vlnu v dôsledku Rayleighovho rozptylu. [1]



Obrázok 2.3: Základná bloková schéma OTDR. [5]

Keď je vláknom vedený svetelný lúč, dochádza k rozptylu svetla na molekulách plynu, ktorých vlnová dĺžka je menšia ako vlnová dĺžka vedeného svetla, výsledkom je tiež mikroskopická zmena indexu lomu v jadre vlákna. V skratke môžeme povedať, že klasická metóda OTDR je založená na Rayleighovom rozptyle, pri ktorej sa časť vyslaného impulzu prechodom vlákna odráža späť k vysielacu, kde je tento odrazený lúč vyhodnotený a jeho amplitúda odpovedá vzdialenosti resp. času odkiaľ sa odrazil. Pulzovaním vstupného optického signálu v optickom vlákne a sledovanie zmien v intenzite rozptýleného svetla, získame tak údaje o priestorových rozptylových koeficientoch, priereze alebo útlme. Táto forma OTDR sa dnes používa hlavne na zistenie chýb, či nedokonalosti komunikačnej optickej trasy. [5]

Obrázok 2.4 nám ukazuje typickú schému OTDR analýzy. Krátky impulz svetla z laseru je vyslaný do testovaného vlákna. Meracia elektronika zachytí a spracuje odrazený signál s časom v pomere ku vstupnému impulzu. Ak je vlákno homogénne, intenzita odrazeného svetla klesá exponenciálne s časom, práve kvôli útlmu vo vlákne. [5]



Obrázok 2.4: Princíp fungovania OTDR. [5]

Maximálny výkon vstupujúceho impulzu s trvaním  $\tau$  je  $P_0$  odrazený výkon detekovaný s časovým oneskorením  $\tau$  od vyslania vstupného impulzu môžeme vyjadriť ako:

$$P_s(t) = (1 - \kappa) \kappa P_0 dr(z) \exp\left[-\int_0^z 2a_i(z)dz\right], \quad (2.1)$$

kde  $z = ct/2n$  je pozícia pôvodného impulzu v čase vytvorenia detekovaného odrazeného signálu  $P_s(t)$ ,  $a_i z$  je útlmový koeficient v neproch ( $1 \text{ Np} = 8,68 \text{ dB}$ ),  $n$  je skupinový index jadra optického vlákna,  $c$  rýchlosť svetla,  $\kappa$  je oddeľovací pomer výkonu na vstupe,  $r(z)$  je koeficient efektívneho spätného odrazu na jednotku dĺžky, ktorý berie do úvahy Rayleighov odrazový koeficient a prierez vlákna, a  $d(=c\tau/n)$  je dĺžka svetelného impulzu vo vlákne v ľubovoľnom časovom okamihu. Predpokladajme, že útlm vstupného pulzu a odrazené svetlo sú si rovné. Strmosť logaritmu tohto detekovaného signálu sa rovná stratovému koeficientu, ktorý je:

$$\frac{\partial(\ln P_s)}{\partial z} = -2 a_i(z). \quad (2.2)$$

Oblasti s vyššou stratou  $a_i$  sú zobrazené vyšším sklonom na trase OTDR, na obr.2.4

Priestorové rozlíšenie OTDR je definované ako najmenšia vzdialenosť medzi dvomi rozptylmi, ktoré môžu byť ňou pozorované a je určené šírkou vstupného impulzu.

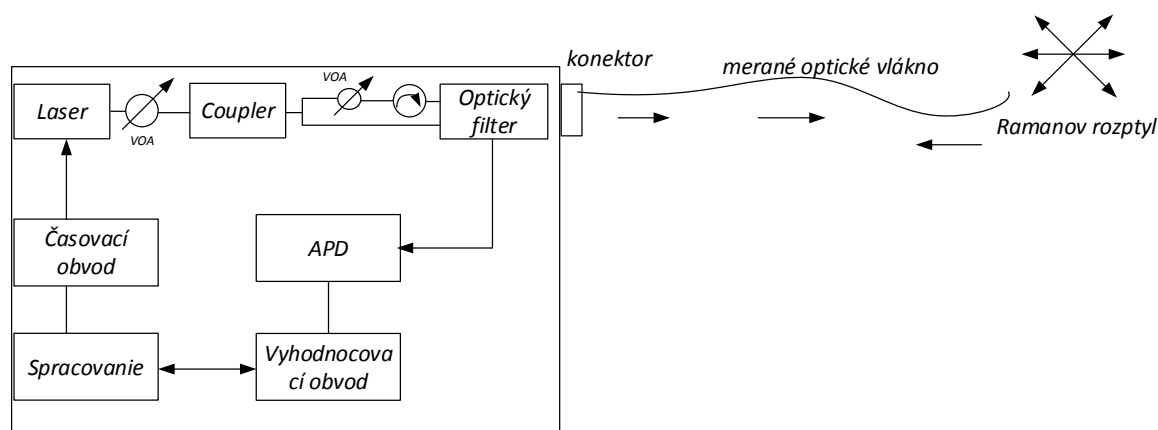
$$\Delta z_{min} = \frac{c\tau}{2n}. \quad (2.3)$$

Pre impulz so šírkou 10 ns je rozlíšenie OTDR na úrovni asi 1m. Vo všeobecnosti impulzy vysielané OTDR sú slabé a získané výsledky je potrebné spriemerovať na dosiahnutie dobrého odstupu signálu od šumu. [5]

Intenzita odrazeného svetla v systéme OTDR, ako vyplýva z rovnice 2.1 je úmerná odrazovému koeficientu  $r(z)$ . A keďže tento koeficient je teplotne závislý, slúži nám táto skutočnosť ako prostriedok pre distribuované meranie teploty. I keď vo vláknach s pevným jadrom je táto závislosť veľmi malá, v tekutých jadrách sú Rayleighov rozptylový koeficient a index lomu závislé na teplote oveľa viac. Teplotné rozlíšenie v tomto prípade použitia tekutého jadra dosahuje na  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  a vzdialenosť asi 1m. Použitie tohto systému však má určité nedostatky, ako rozpínanosť tekutého jadra vlákna so zvyšujúcou sa teplotou, obmedzený rozsah meranej teploty a teplotne závislý priemer vlákna, čo spôsobilo nevhodnosť tejto konfigurácie pre väčšinu praktických aplikácií. Neskôr sa výskum klasickej OTDR prestal uberať smerom distribuovaného monitorovania teploty a dnes sa používa výhradne na zisťovanie nehomogenít na trase. [5]

## 2.3 DTS

DTS (Distributed Temperature Sensing) využíva mnoho vidové optické vlákno ako snímač, v tomto prípade snímač teploty, ktorý nám umožní jediným meraním získať niekoľko tisíc hodnôt teploty a v podstate tak určiť profil teploty pozdĺž optického vlákna. Ako u iných optovlaknových systémoch aj tu sa svieti do optického vlákna a následne sa analyzuje svetlo, ktoré sa vracia späť do vyhodnocovacej jednotky. Nás zaujíma chovanie signálov v bočných pásmach, nie signál na rovnakej vlnovej dĺžke, akou do vlákna svietime. Vzdialenejšie pásma sú označované ako Ramanove pásma a zrovnanie jeho tzv. Stokes a anti-Stokes časti nám dáva informácie o teplote. [8]



Obrázok 2.5: Základná bloková schéma DTS. [8]

### 2.3.1 Princíp DTS systémov

Optovláknové systémy sú založené na podobnom princípe ako optické reflektometry OTDR. Do vlákna je vyslaný optický impulz o definovanej šírke (10ns) a vlnovej dĺžke (975nm, 1064nm, alebo 1550nm) v závislosti na konštrukcii systému. Pri priechode optického pulzu vláknom sa vplyvom rozptylu odráža časť svetelnej energie, ktorá sa vracia späť k vysielaču. Práve vďaka frekvenčnej a amplitúdovej analýze tejto odrazenej energie ide s veľkou presnosťou určiť teplotu pozdĺž vlákna. Časť optického pulzu sa k vysielaču vracia z rovnakou vlnovou dĺžkou akú mal pôvodne vyslaný impulz. Vtedy hovoríme že sa jedná o tzv. elastický Rayleighov rozptyl. Iná časť svetelného impulzu sa vracia s odlišnou vlnovou dĺžkou než pôvodne vyslaný impulz. Hovoríme o tzv. neelastických stimulovaných rozptyloch a to Ramanovom a Brillonov. Pomocou spektier nelineárnych javov dokážeme získať alebo vypočítať meranú veličinu. [8]

DTS systémy sa preto delia podľa konštrukcie a v závislosti na použitom druhu rozptylu, ktorý potrebujú k svojej činnosti. Presnosť merania teploty závisí na integračnej dobe, po ktorú prebieha meranie a na počte iterácií pri výpočtoch. Tieto parametre sú nastavované pred každým meraním a platí, že čím je doba integrácie dlhšia a počet iterácií väčší, tým sú presnejšie aj získané hodnoty.

Priestorové rozlíšenie DTS systému je štandardne 1m s presnosťou  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , pri rozlíšení  $0,01^{\circ}\text{C}$ . [8]

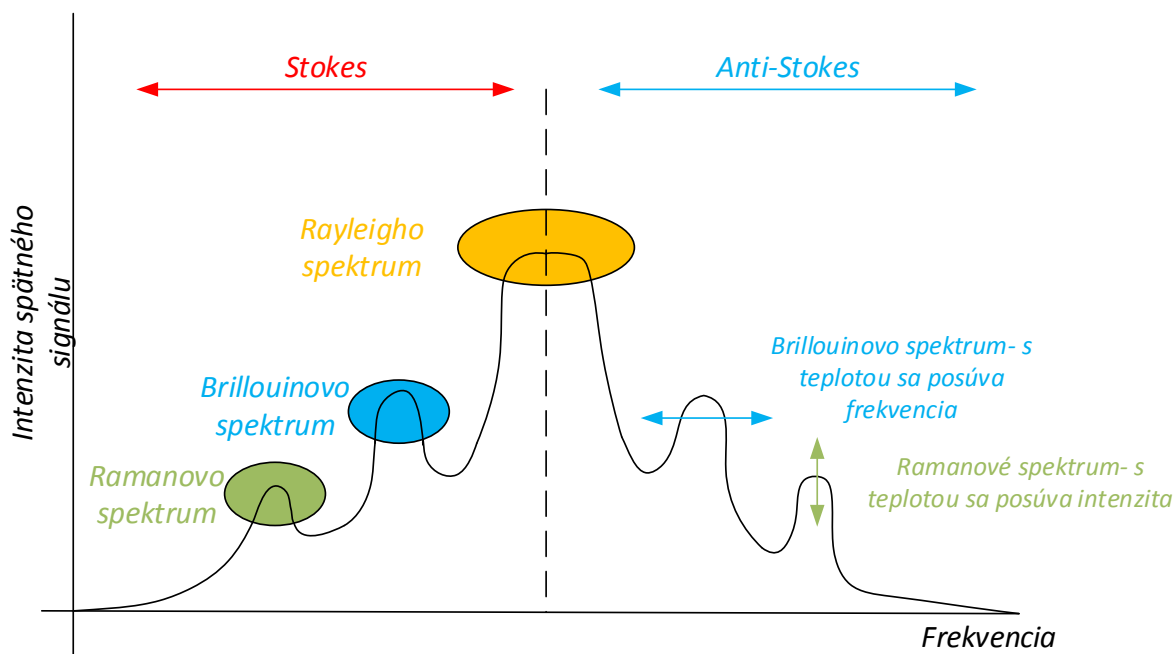
### 2.3.2 Použitie DTS systémov

Optovláknový systém DTS je používaný pre sledovanie teploty v mnohých oblastiach. Najčastejšie sa ide s nimi stretnúť v proti požiarnych systémoch (najmä v tuneloch), pri sledovaní teploty pozdĺž energetických silových káblov vvn uložených v zemi alebo pozdĺž fázových vodičov nadzemných energetických prenosových trasách, poprípade pri meraní teploty pozdĺž produktovodu a sledovanie prípadných únikov napr. pary, čpavku, ropy. Systém DTS ide na základe vyhodnotenia zmien teploty využiť k okamžitému riadeniu prebiehajúcich procesov alebo aj k predchádzaniu možným poruchám či dokonca haváriám. Software systému DTS umožňuje rozdeliť meranú oblasť do jednotlivých zón, takže okrem celkového teplotného profilu ide pre merané body zahrnuté v jednotlivých zónach vyhodnotiť maximálnu, minimálnu, priemernú teplotu a tieto hodnoty porovnávať s nastavenými hodnotami pre spúšťanie výstrahy v danej zóne. Zariadenie môže komunikovať aj zo vzdialenými riadiacimi centrami. [7]

### 3 Rozptyl svetla vo vláknach

Rozptyl svetla v optickom komunikačnom vlákne je prítomný stále, bez ohľadu na optický výkon vo vlákne. Môžeme to rozdeliť do dvoch režimov spontánny a stimulovaný rozptyl. Spontánny rozptyl svetla sa vzťahuje na proces rozptylu za takých podmienok, že optické vlastnosti materiálu nie sú ovplyvnené súčasným stavom elektrického poľa. V prípade dopadu žiarenia s dostatočnou intenzitou spontánny rozptyl svetla môže byť intenzívnejší. V tomto režime vlastnosti rozptylu procesu výrazne mení optické vlastnosti materiálu a naopak.

Spontánny a stimulovaný rozptyl môže byť výsledkom Rayleighovho, Ramanovho a Brillouinovho rozptylu. Rayleighov rozptyl vzniká v dôsledku fluktuácií hustoty a môže byť označený ako rozptyl z fluktuácií entropie. Ramanov rozptyl vyplýva z interakcie svetla s vibračnými stavmi molekúl v rozptyľujúcom médiu, rovnako sa naň môžeme pozerieť ako na rozptyl svetla z optických fonónov. Brillouinov rozptyl vyplýva z interakcie svetla so šíriacimi sa vlnami hustoty, alebo akustickými fonónmi. Každý z týchto procesov rozptylu je vždy prítomný v optickom vlákne, pretože každé vlákno má mikroskopické chyby, alebo fluktuácie teploty, ktoré spôsobujú tieto tri procesy. [9]

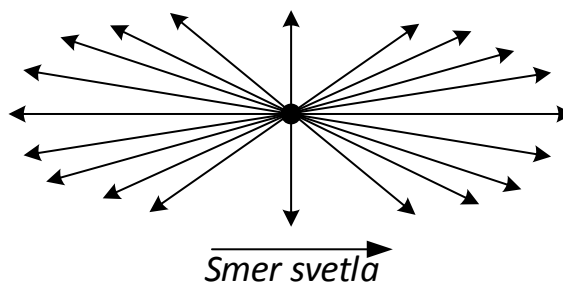


Obrázok 3.1: Zložky rozptýleného svetla. [9]

#### 3.1 Rayleighov rozptyl

Je dominantný jav v oknách (vlnových dĺžok) optickej komunikácii. Vzniká tepelnými kmitmi kryštalickej mriežky, keď cez ne prechádza svetlo a nedá sa odstrániť ani podchladením na absolútnu nulu. Čiastočne sa dá eliminovať posunom pracovnej frekvencie do infračervenej oblasti. Zákonitosti rozptylu svetla v matných (kalných) prostrediach prvýkrát experimentálne študoval J. Tyndall už v roku 1869. Teoreticky ich vysvetlil J.W. Rayleigh v roku 1899. Rayleigh, podobne ako pred ním Isaac Newton, sa len snažili dokázať, prečo je obloha modrá a nie červená. Keď na rozptyľujúce prostredie

dopadá monochromatické svetlo, pričom nedochádza k zmene vlnovej dĺžky  $\lambda$  (alebo kruhovej frekvencie  $\omega$ ) hovoríme o Rayleighovom rozptyle. [10]



Obrázok 3.2: Rayleighov rozptyl. [11]

Pre intenzitu tohto rozptylu platí:

$$I = I_0 \left(\frac{d}{2}\right)^6 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2-1}{n^2+1}\right) \frac{1+\cos^2\theta}{2R^2}, \quad (3.1)$$

kde  $I_0$  je pôvodná intenzita svetla,  $d$  je priemer rozptyľujúcej častice,  $n$  je jej index lomu,  $\theta$  je rozptyľový uhol a  $R$  je vzdialenosť od častice. Z obrázku 3.2 je vidieť, že malé častice, pre ktoré sa používa jednoduchšia Rayleighova teória, rozptyľujú svetlo do všetkých strán, aj keď najvýraznejší je spätný a dopredný rozptyl. Podmienka použitia Rayleighovej teórie je:

$$\frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1 \rightarrow r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \rightarrow r \approx 100\text{nm}, \quad (3.2)$$

kde  $r$  je polomer rozptyľujúcej častice. Mieová teória tieto obmedzenia nemá a preto sa dá použiť na výpočet rozptylu na časticiach ľubovoľnej veľkosti. Dôsledkom Rayleighovho rozptylu je fluktuácia indexu lomu vo vlákne. Nehomogenity vo vlákne spôsobujúce tento rozptyl možno čiastočne redukovať zlepšením technológie výroby optických vlákien. Príspevok Rayleighovho rozptylu k celkovému tlmeniu optického vlákna dĺžky  $L$  je:

$$L_{TR} = \exp\{-\gamma_R L\}, \quad (3.3)$$

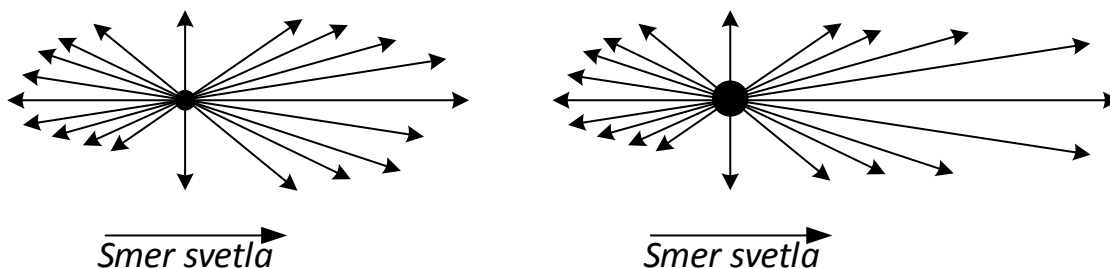
kde  $\gamma_R$  je koeficient Rayleighovho rozptylu:

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c K T_F, \quad (3.4)$$

$\lambda$  je vlnová dĺžka,  $n$  index lomu jadra optického vlákna,  $p$  je stredná hodnota fotoelastického koeficientu,  $\beta_c$  je koeficient izotermálnej stlačiteľnosti pri fiktívnej teplote  $T_F$  a  $K$  je Boltzmanova konštanta. [11],[12]

### 3.2 Mieov rozptyl

Vzniká na nehomogenitách zrovnateľných s vlnovou dĺžkou svetla. Má veľkú uhlovú závislosť. Príčiny vzniku tohto rozptylu sú mikroskopické bublinky vo vlákne, napätie vo vlákne, kolísanie priemeru jadra, nedokonalá cylindrická štruktúra vlnovodu, nečistoty vo vlákne a ďalšie aspekty zrovnateľné s vlnovou dĺžkou. Nevýhodou matematického popisu Mieivho rozptylu je jeho vyššia náročnosť oproti Rayleighovmu, a preto keď sú splnené podmienky pre Rayleighov rozptyl alebo sa uspokojíme s menšou presnosťou, používa sa práve Rayleighov. Na obrázku 3.3 je vidno, že Mieov rozptyl svetlo rozptyľuje najmä v doprednom smere a so zväčšovaním sa polomeru rozptyľujúcej sférickej častice sa rozptýlené svetlo koncentruje stále viac v smere dopredu. [11]



Obrázok 3.3: Mieov rozptyl. [11]

### 3.3 Brillouinov rozptyl

Z teórie tuhých látok je známe, že elektromagnetická vlna (svetelná vlna), môže v tuhej látke, v kvapaline alebo plyne interagovať s inými typmi vĺn, napr. akustickými vlnami, v magnetickej látke so spinovými vlnami a podobne. Pri pružnej deformácii prostredia, či pri zmene hustoty kvapaliny alebo plynu dochádza k zmene indexu lomu týchto prostredí. Brillouinov rozptyl je rozptyl svetelnej vlny na akustickej vlne. [10]

Z kvantovo-mechanického hľadiska, svetlo chápeme, ako súbor fotónov s energiou jedného fotónu:

$$E_F = \hbar \omega_F, \quad (3.5)$$

a impulzom:

$$\vec{p}_F = \hbar \vec{k}_F, \quad (3.6)$$

kde  $\omega_F$  je kruhová frekvencia svetelnej vlny,  $\vec{k}_F$  je jej vlnový vektor,  $\hbar$  je redukovaná Planckova konštanta. Na akustickú vlnu nazeráme zas ako na súbor fonónov – častíc s energiou.



$$E_A = \hbar \omega_A, \quad (3.7)$$

a impulzom:

$$\vec{p}_A = \hbar \vec{k}_A, \quad (3.8)$$

Z pohľadu kvantovej mechaniky na interakciu svetelnej vlny s látkou potom nazeráme ako na proces, keď fotón dáva vznik novému fotónu a jednému fonónu, alebo naopak, fotón a fonón dávajú vzniknúť novému fotónu. [10]

### 3.4 Ramanov rozptyl

Najjednoduchší popis stimulovaného Ramanovho rozptylu je pomocou kvantovým mechanickým modelom. Okrem kvantového mechanického modelu dokážeme Ramanov stimulovaný rozptyl opísať kľúčovou vlastnosťou tzv. polarizabilitou molekúl. Polarizabilita alebo elektrická polarizovateľnosť  $a$ , je veľmi dôležitou charakteristikou molekuly, lebo ukazuje, ako ľahko sa dá molekula v elektrickom poli definovať. Polarizabilita predstavuje spoločne s pôsobiacim elektrickým poľom  $E$ , vyvolávanie dipólového momentu  $\mu$ . Frekvenčne závislý indukovaný dipólový moment molekuly má tvar:

$$\mu = a E, \quad (3.9)$$

kde  $E$  je vektor elektrickej intenzity dopadajúcej monochromatickej vlny o frekvencii  $\omega_l$  a  $a$  je tenzor polarizovateľnosti molekuly. Vzťah 3.9 je systémom 3 lineárnych rovníc v maticovej formulácii:

$$\begin{pmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{zx} & a_{zy} & a_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

kde deväť koeficientov  $a_{ij}$  predstavuje zložky tenzoru polarizovateľnosti  $a$ . V prípade nerezonančného rozptylu je tenzor polarizovateľnosti symetrický, potom má iba šesť nezávislých zložiek.

Intenzita elektrickej komponenty dopadajúceho žiarenia môže byť vyjadrená ako:

$$E = E_0 \cos 2\pi t v_{vib}, \quad (3.11)$$

kde  $E_0$  je amplitúda a  $\nu_0$  je frekvencia dopadajúceho žiarenia. Elektromagnetické žiarenie indukuje premenný dipól o frekvencii  $\nu_0$  v molekule. Tento indukovaný dipól je zdrojom žiarenia. Dipólový moment v klasickom priblížení, platí pre molekulu integrujúcu so žiarením:

$$\mu = a E \cos(2\pi \nu_0 t) + \frac{E r}{2} \left( \frac{\partial a}{\partial r} \right) \cos(2\pi t (\nu_0 + \nu_{vib})) + \cos(2\pi t ((\nu_0 - \nu_{vib}))), \quad (3.12)$$

kde  $\nu_0$  frekvencia budiaceho žiarenia,  $\nu_{vib}$  je vibračná frekvencia,  $r$  sú vnútorné súradnice molekuly. Z rovnice vyplýva, že molekula emituje žiarenie s nezmenenou frekvenciou, prvá časť rovnice ( $2\pi \nu_0 t$ ), je Rayleighov rozptyl. Druhá časť rovnice predstavuje samotný Ramanov rozptyl, respektíve jeho Stokes časť ( $\nu_0 - \nu_{vib}$ ) a anti-Stokes časť ( $\nu_0 + \nu_{vib}$ ). Z tejto časti rovnice je zrejmé, že existencia Ramanovho rozptylu je závislá na zmene porarizability  $a$  pri zmene pozície  $r$ . Preto je nutné aby pri danom vibračnom pohybe dochádzalo k zmene polarizovateľnosti, teda: [13]

$$\frac{\partial a}{\partial r} \neq 0. \quad (3.13)$$

Ak by zmena polarizovateľnosti počas vibračného pohybu bola nula, zostala by v rovnici nenulový člen iba Rayleighov rozptyl. Príčina vzniku Ramanovho rozptylu je spôsobená interakciou fotónov s molekulami kremenného skla. Intenzita Ramanovho rozptylu je oveľa nižšia ako Rayleighov rozptyl. Pre vznik anti-Stokes časti je potrebné aby molekula bola na vyšších vibračných energetických stavov na začiatku procesu.

Na určenie Ramanovho prahu by sme mali uvažovať s nelineárnou interakciou medzi vstupnou vlnou a Stokes vlnou. V prípade kontinuálnej je táto interakcia riadená nasledujúcou sústavou rovníc: [14]

$$\frac{\partial I_s}{\partial z} = g I I_s - a_s I_s, \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial I_p}{\partial z} = \frac{\omega}{\omega_s} g I I_s - a I, \quad (3.15)$$

kde  $a_s$  a  $a$  zodpovedá za straty vlákna na frekvencií Stokes vln. Dá sa jednoducho overiť, že pri vylúčení strát:

$$\frac{\partial}{\partial z} = \left( \frac{I_s}{\omega_s} + \frac{I}{\omega} \right) = 0, \quad (3.16)$$

Táto rovnica uvádza jedine to, že celkový počet fotónov v čerpacej a Stokes lúči zostáva konštantný počas stimulovaného Ramanovho rozptylu. Stimulovaný Ramanov rozptyl je prahový jav, ktorý vzniká, ak intenzita čerpacej svetelnej vlny o frekvencii  $\omega$  dopadajúca na látkové prostredie prevyšuje prahovú hodnotu  $I \geq I_{thr}$ . Pri splnení tejto podmienky na Stokes vlna s frekvenciou  $\omega_s = \omega - \omega_M$  exponenciálne zosilňuje pri šírení prostredím. Predpokladajme jej šírenie v kladnom smere osy  $z$ , potom:

$$I_s = I_{s0} \exp(g I z), \quad (3.17)$$

kde pre faktor zosilnenia  $g$  platí úmernosť:

$$g \sim \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right). \quad (3.18)$$

Zatiaľ čo intenzita spontánneho Ramanovho rozptylu je v porovnaní s intenzitou budiaceho žiarenia omnoho radov nižšia, stimulované Stokes (alebo anito-Stokes) Ramanove žiarenie dosahuje intenzity porovnateľných s intenzitou budiaceho žiarenia. Stimulovaný Ramanov rozptyl je dôsledkom interakcií medzi optickým žiarením a vysokofrekvenčnými vibračnými zložkami prostredia vlákna. V skutočnosti stimulovaný Ramanov rozptyl sa vytvorí zo spontánneho Ramanov rozptyl nastávajúcom na celej dĺžke vlákna.  $L_e$  je efektívna dĺžka vlákna definovaná Ramanovým ziskom  $g$  a stratami vo vlákne  $b$ :

$$L_e = \frac{1 - e^{-a g}}{b} \sim \frac{1}{b}. \quad (3.19)$$

Stokes výkon je definovaný s exponenciálnym zosilnením  $g$  ako: [13]

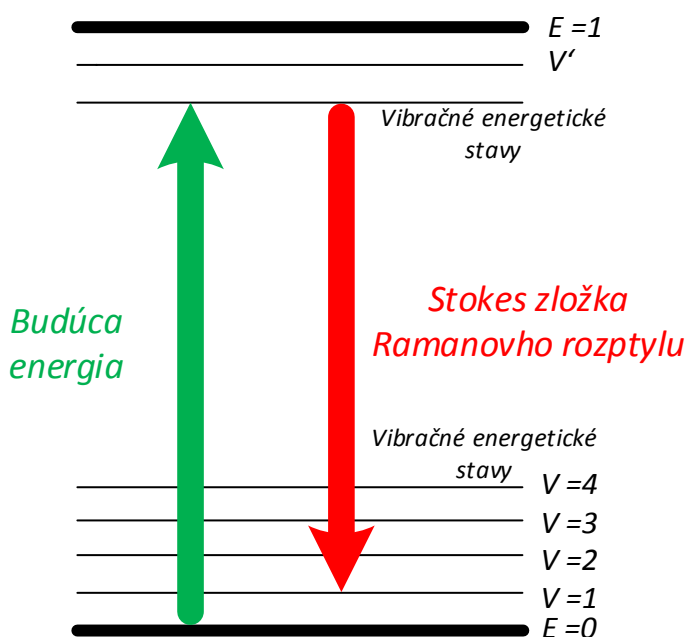
$$P_s(L) = P_s(0) e^{(g P(0) L_e / A_e)}, \quad (3.20)$$

kde  $g$  vyjadruje účinnosť Ramanovho zisku,  $P(0)$  je výkon čerpacej vlny,  $L_e$  je efektívna dĺžka vlákna,  $P_F(0)$  je výkon signálu a  $A_e$  predstavuje efektívny prierez jadra vlákna. Pretože prah pre dopredný stimulovaný Ramanov rozptyl je dosiahnutý skôr danom čerpacej výkone, všeobecne nie je spätný stimulovaný Ramanov rozptyl pozorovaný v optických vláknach. Ramanov zisk môže byť použitý v spätne na šíriacich signálov, takže Ramanov prah je zvýšený násobkom čísla, ktorého hodnota leží medzi prvým a druhým. Najmä ak je polarizácia kompletne rozhádzaná, zvýši sa o násobok dva. [14]

Napriek rôznym úpravám je možné predpovedať Ramanov prah celkom presne. Pre dlhé vlákna, také že  $a \gg 1$ ,  $L_e \approx 1/a$ . Na vlnovej dĺžke  $\lambda = 1,55 \mu m$ , blízko ktorej je tlmenie vlákna minimálne okolo  $0,02 dB \text{ km}^{-1}$ ,  $L_e \approx 20 km$ . Pri typickej hodnote  $A_e = 50 \mu m$ , predpokladaný Ramanov prah je  $P(0) \approx 600 mW$ . Čo je veľmi mala hodnota pre vznik stimulovaného Ramanovho rozptylu.

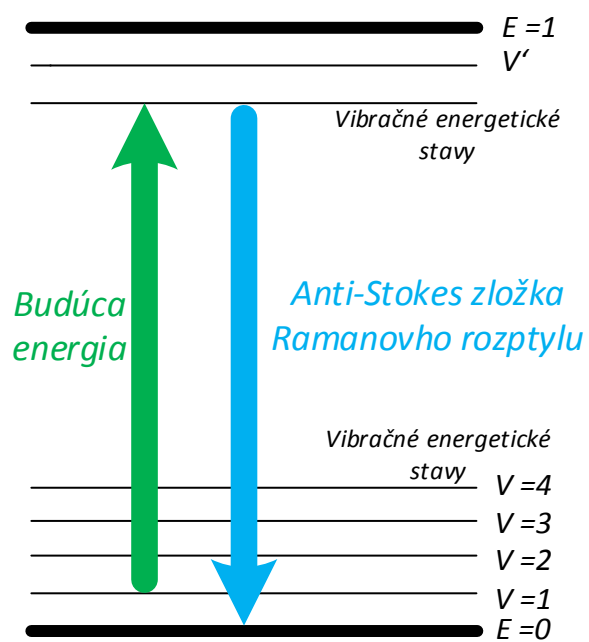
### 3.4.1 Stokes a anti-Stokes časť Rahmanového rozptylu

Pri neelastickej (nepružnej) zrážke fotónov budúceho žiarenia s molekulou môže dôjsť ku zníženiu, či zvýšeniu energie fotónu. V prípade zníženia energie fotónu, predá fotón určité kvantum svojej energie molekule. Jedná sa o presne také kvantum, ktoré umožní molekule prejsť do vyššieho vibračného stavu. Fotón má po zrážke nižšiu energiu a teda aj nižšiu frekvenciu. Príslušný pás bude v Ramanovom spektre posunutý od pásu budúceho žiarenia smerom k nižším energiám do tzv. Stokes oblasti vid'. obrázok 3.4 . Jedná sa o červený posun, to je posun smerom k nižším frekvenciám alebo k väčším vlnovým dĺžkam. [15]



Obrázok 3.4: Stokes časť Ramanovho rozptylu. [15]

Fotón žiarenia sa zrazí s molekulou. Behom zrážky sa molekula dostane na virtuálnu excitovanú vibračnú energetickú hladinu a následne klesne na vibračnú energetickú hladinu, ktorá je vyššia než základná hladina. Molekula teda zostane po zrážke s fotónom v excitovanom vibračnom stave. Energia nutná k udržaniu molekuly v excitovanom stave, je odobraná fotónu. Ten má preto po zrážke nižšiu energiu (frekvenciu) ako pred zrážkou. V prípade zvýšenia energie fotónu, získa fotón energiu od molekuly, veľkosť obdržanej energie je totožná s energetickým kvantom, ktoré molekula uvoľní pri prechodu z vyššej na nižšiu vibračne-rotačnú energetickú hladinu. Fotón má po zrážke vyššiu energiu a teda aj vyššiu frekvenciu. Príslušný pás bude v Ramanovom spektre posunutý od pásu budúceho žiarenia smerom k vyšším energiám do tzv. anti-Stokes oblasti vid'. obrázok 3.5. Jedná sa o modrý posun, posun smerom ku kratším vlnovým dĺžkam. [15]



Obrázok 3.5: Anti-Stokes časť Ramanovho rozptylu. [15]

## 4 Aplikácia v programe MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) je interaktívne programovacie prostredie a skriptovací programovací jazyk pre operačné systémy Windows, Linux aj MacOS. Jedná sa o systém vhodný pre vedecké a inžinierske výpočty, modelovanie, simulácie, analýzu a vizualizáciu dát, vývoj algoritmov a aplikácií vrátane tvorby grafického užívateľského rozhrania. Veľké uplatnenie nachádza najmä v technických oboroch a ekonómií. Možnosti programu MATLAB rozširujú rôzne knižnice funkcií (toolboxy), súbory M-funkcií zamerané na špeciálne účely. Program MATLAB má značnú podporu prostredia na stránkach <http://www.mathworks.com/>.

### 4.1 Popis aplikácie

Aplikácia má za úlohu spracovávať namerané dáta pomocou senzorického systému DTS a následne vykresľovať 2D a 3D grafy v reálnom čase. K tomu bolo vytvorené grafické používateľské rozhranie, ktoré bolo rozdelené do dvoch užívateľských okien. Prvé okno aplikácie slúži pre zadávanie vstupných parametrov prevádzaného merania. Tieto vstupné parametre sú potrebné pre správnu funkčnosť aplikácie. Získavajú sa tu hodnoty ako napríklad získanie cesty k súborom, dĺžka predradného vlákna alebo nastavenie automatického alebo manuálneho rozsahu teploty na osi grafu a colorbare atď. (viď obrázok 4.1). V druhom okne aplikácie sa vykresľujú v reálnom čase namerané hodnoty DTS systémom. Zobrazujú sa tu dva grafy jeden 2D a druhý 3D, ďalej zoznam v ktorom sa zobrazujú všetky namerané súbory v danom prierežku. V tomto druhom okne aplikácie sa nachádzajú aj ďalšie tlačidlá s funkciami ako uloženie 2D a 3D grafu ako aj celého zoznamu súborov viď. obrázok 4.8. V druhom okne aplikácie sa vykonávajú všetky najdôležitejšie úlohy ako načítanie, otvorenie, rozparovanie dát zo súboru a uloženie do poľa, ktoré sa vykresľuje.

#### 4.1.1 Prvé okno aplikácie

##### Zadanie Osí M a N (1)

Tieto dve okna slúžia pre zadávanie rozmerov siete, ktorou sa prevádza meranie. Rozmer N nám zadáva počet krúžkov v stĺpcoch. Rozmer M nám udáva koľko riadkov krúžkov sa nachádza na meracej sieti.

Hodnoty sú získavané pomocou funkcie *Edit boxu*. Odkiaľ je odoberaná hodnota vo forme stringu, ktorá je následne prevádzaná na numerickú hodnotu. Táto hodnota je ešte kontrolovaná, či užívateľ zadal numerickú hodnotu viď. Výpisok 1.

```
X = get(handleTo, 'String');
Y = str2num(X());

Z= isempty(Y);

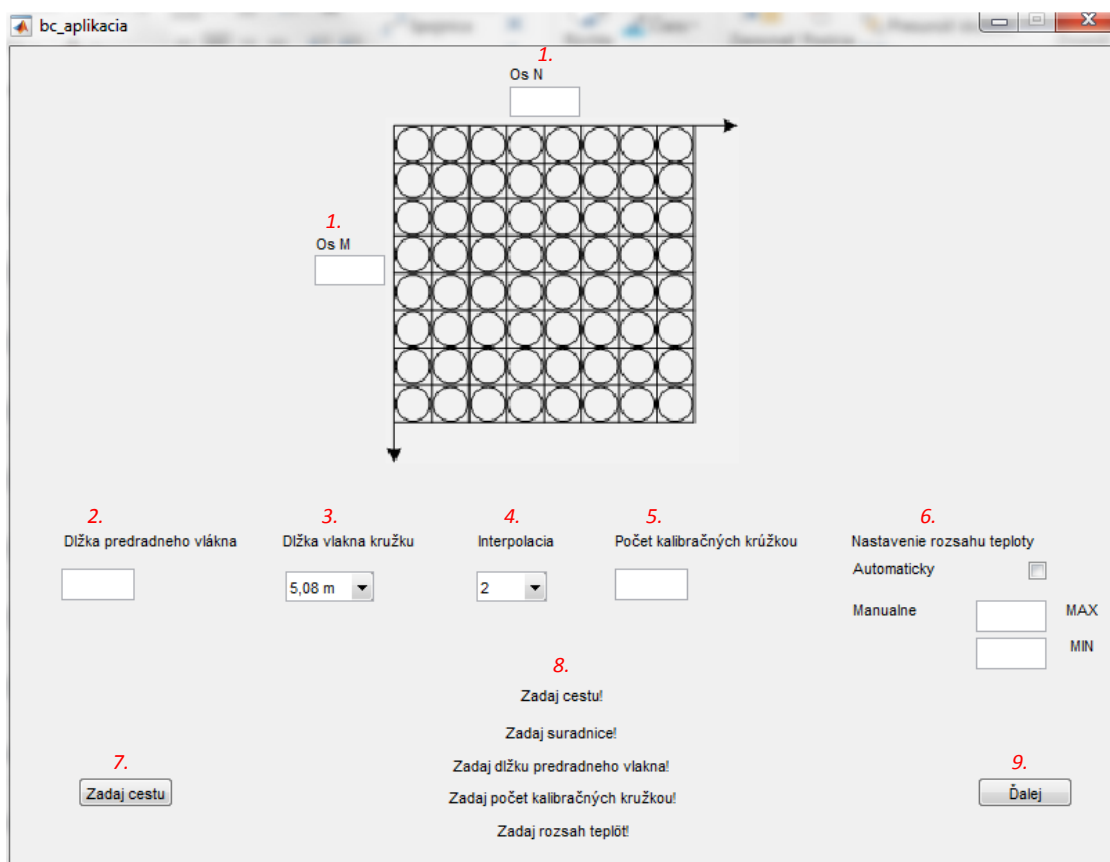
if Z==0
    X =Y;
else
    set(handleTo, 'String', 'Výpis upozornenia');
end
```

Výpisok 4.1: Získanie a kontrola hodnoty z Edit box-u

### Zadanie dĺžky predradného vlákna (2)

Toto okno slúži pre zadanie dĺžky predradného vlákna. Hodnotu je získavaná obdobne ako v popise číslo jedna vid'. Výpisok 4.1.

Predradne vlákno je zapojene medzi senzorickým systémom DTS a meranou sieťou. Úlohou tohto predradného vlákna je odstrániť tzv. mŕtvu zónu DTS prístroja a zabezpečiť odstránenie rozptylu na konektore.



Obrázok 4.1: Prvé okno aplikácie.

### Výber dĺžky vlákna v krúžku (3)

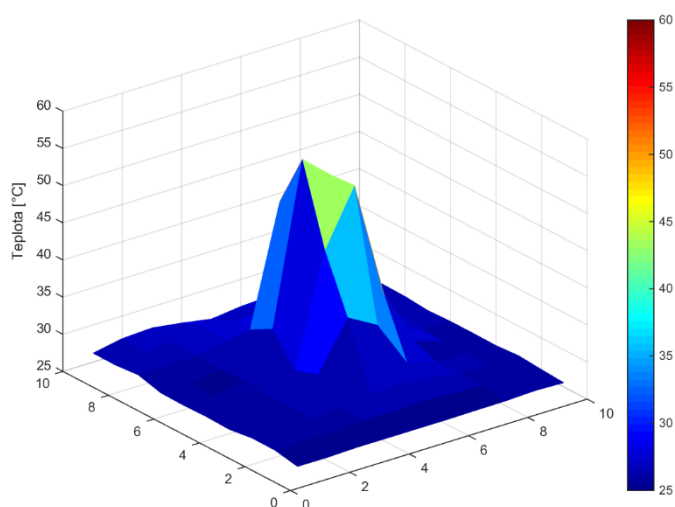
Táto funkcia zabezpečuje výber dĺžky optického vlákna namotaného v jednom štvorčeku siete. Dĺžka optického vlákna v krúžku závisí od konštrukcie danej siete. Čím je dlhšie optické vlákno namotané v krúžku tým viac hodnôt užívateľ získa a výsledný priemerovaný výsledok bude presnejší. Túto funkciu zabezpečuje rolovacie menu. Kde pomocou kódu Výpisok 4.2 môžeme vyberať zo šiestich možností (1,02m, 2,03m, 3,05m, 4,06m, 5,08m a 6,09m).

```
switch get(handleTo, 'Value')
    case 1
        x= a;
    case 2
        x= b;
    case 3
        x= c;
    case 4
        x= d;
    case 5
        x= e;
end
```

Výpisok 4.2: *Získanie hodnoty z rolovacie menu.*

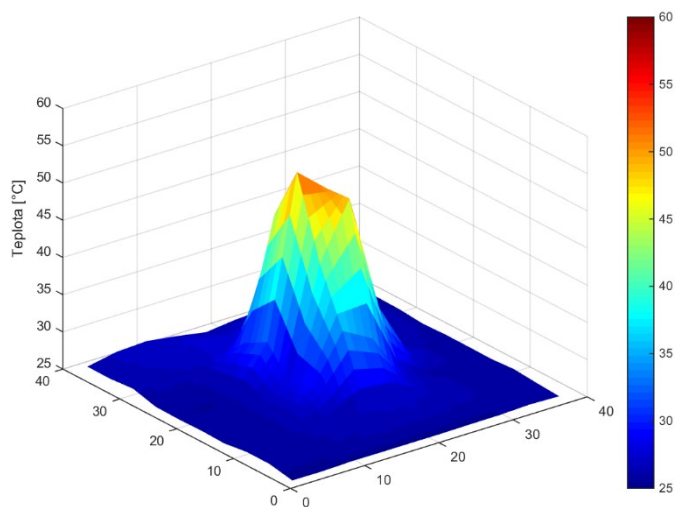
### Interpolácia (4)

Funkcia pre výber veľkosti interpolácie, ktorá slúži na vyhladenie 2D a 3D grafov. Hodnota je získavaná ako v predchádzajúcom treťom bode čiže cez rolovacie menu vid'. Výpisok 4.2. Na výber sú veľkosti interpolácií 0 až 5. V programe je využívaná funkcia interp2. Obecný tvar funkcie je:  $Z = \text{interp2}(X, Y)$ , kde  $X$  je pôvodná matica, ktorú budeme interpolovať a  $Y$  je hodnota, ktorú získavame pomocou rolovacieho menu a určuje veľkosť interpolácie. Na obrázkoch 4.2, 4.3, 4.4 môžeme vidieť rozdiel interpolácií pri hodnotách 0, 2 a 5

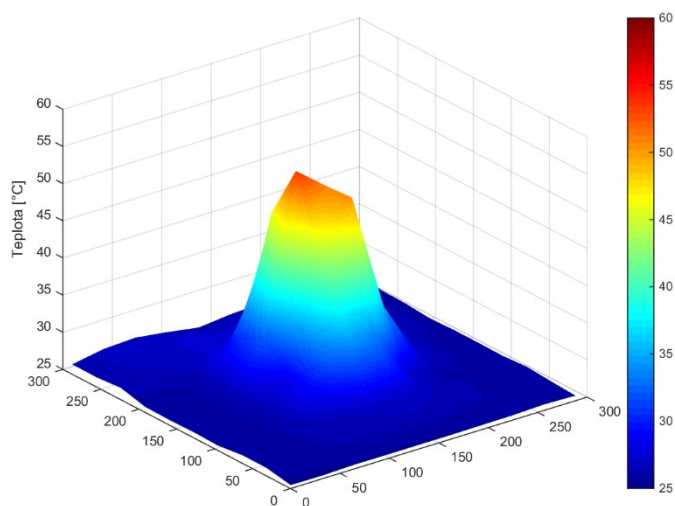


Obrázok 4.2: *Interpolácia s hodnotou 0.*





Obrázok 4.3: *Interpolácia s hodnotou 2.*



Obrázok 4.4: *Interpolácia s hodnotou 5.*

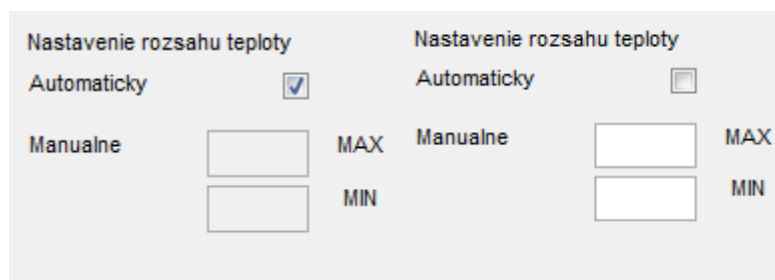
#### **Zadanie počtu kalibračných krúžkov (5)**

Funkcia zadania počtu kalibračných krúžkov slúži k zadaniu počtu krúžkov, ktoré slúžia ku kalibrácii meracej siete. Viac je o kalibrácii popísané v kapitole číslo šesť. Hodnota počtu kalibračných krúžkov je získavaná rovnako ako v bode jedna viď. Výpisok 4.1.

#### **Nastavenie rozsahu teploty (6)**

Funkcia nastavovania teploty má dva režimy automatický a manuálny. Automatický režim je zapnutý zaškrtnutým políčkom „Automatický“, pričom manuálne nastavenia zostávajú uzamknuté viď obrázok 4.5. Automatický režim nastavuje hodnoty osí, automaticky podľa nameraných dát. Manuálny režim aktivujeme od kliknutím zaškrťavajúceho políčka „Automatický“, kde potom môžeme nastavovať

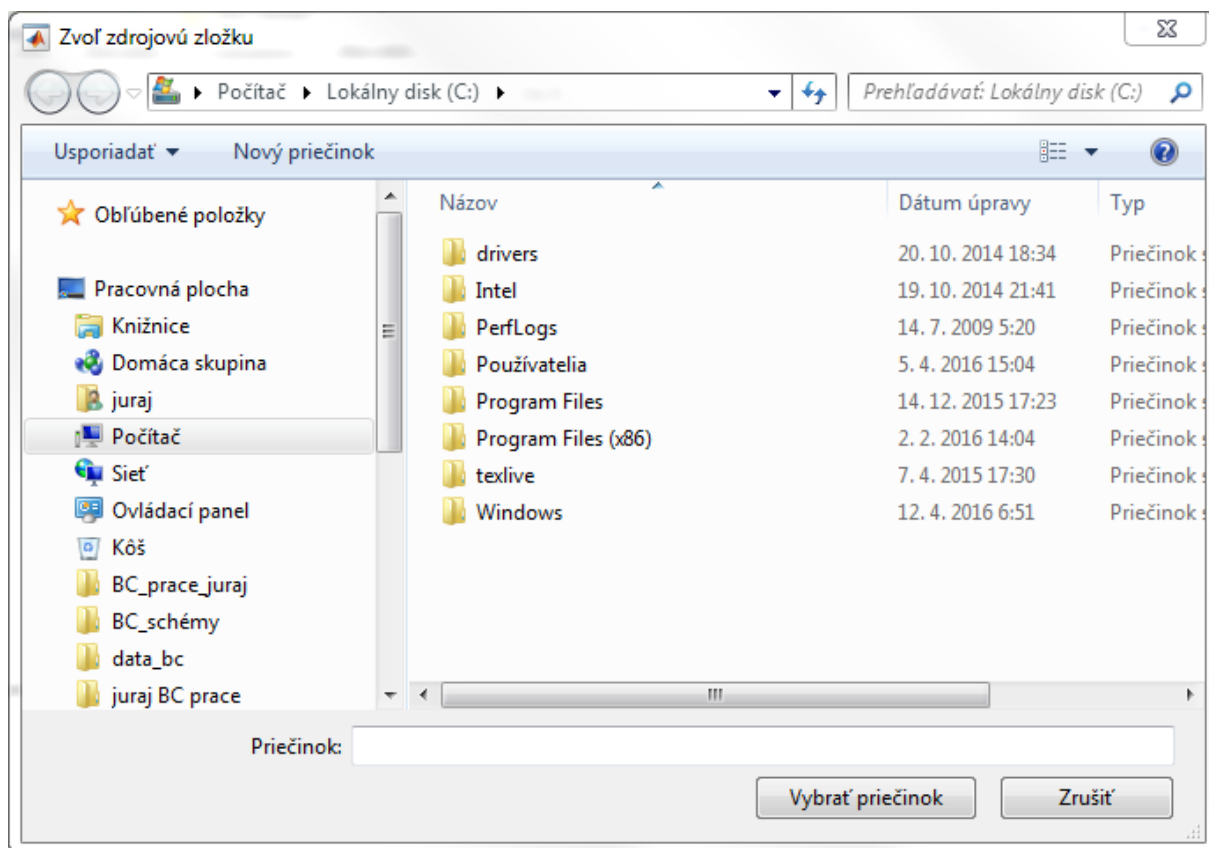
maximálnu a minimálnu hodnotu osí vid'. obrázok 4.5. Tieto hodnoty sú získavané rovnako ako v bode jedna vid'. Výpisok 4.1.



Obrázok 4.5: Automatický režim (vpravo) a manuálny režim (vľavo).

### Výber cesty k súboru (7)

Funkcia výberu cesty k súboru ma na starosti vybrať priečinok, kde sa nachádzajú súbory s nameranými hodnotami. Alebo pri vyhodnocovaní v reálnom čase zdieľaný priečinok DTS systému. Načítavajú sa len súbory s príponou .ddf. Táto cesta je získavaná pomocou funkcie `uigetdir()`, ktorá vyvolá dialógové okno, kde si užívateľ vyberie cestu k danému priečinku vid'. obrázok 4.6.



Obrázok 4.6: Výber zdrojového priečinka.

### Výpis chybových hlášok (8)

Tieto chybové hlášky sa vypisujú keď nie sú zadané potrebné parametre k pokračovaniu do ďalšieho okna alebo ich užívateľ zadal nesprávne. Chybové hlášky sa vypisujú pomocou funkcie statického textu.

### Tlačidlo pre pokračovanie v druhom okne (9)

Tlačidlo Ďalej slúži pre spustenie druhého okna aplikácie, ak sú zadane správne všetky potrebné parametre.

## 4.1.2 Druhé okno aplikácie

### Vykreslenie 2D a 3D grafov(1)

Funkcia pre vykreslenie 2D a 3D grafov dokáže vykresľovať dáta ktoré sa už nachádzajú v priestore ako aj dáta namerané v reálnom čase. Ďalej táto funkcia umožňuje natáčanie grafov do polohy akú si zvolí užívateľ. Pre vykreslenie 2D grafu je využívaná funkcia *imagesc()* a pre vykresľovanie 3D grafov je využívaná funkcia *surf()*. Pre otáčanie grafov bola využitá funkcia *rotate3d*.

### Zoznam súborov (2)

Táto funkcia má za úlohu zobrazovať načítané súbory ako aj novo pridané. V zozname sa zobrazujú dátum a čas merania postupne ako boli namerané. Funkcia po kliknutí v zozname, vybraný súbor opäť vykreslí v 2D a 3D grafe. Toto kliknutie sa prejaví aj na posuvníku, ktorý sa nastaví na hodnotu daného súboru. Ďalej sa pod zoznamom nachádza tlačidlo Uložiť, ktoré umožňuje uložiť celý zoznam súborov kam potrebujeme.

```
s{i}=MyDirInfo(i).('date');  
set(handles.listbox,'String',s);
```

Výpisok 4.3: Získanie dátumu a zápis do zoznamu.

Načítané súbory ako aj novu pridané sú načítavané do štruktúry zoznamu. Do tejto štruktúry sú ukladané podľa dátumu vid'. Výpisok 4.3. Pre uloženie celého zoznamu bola využitá funkcia *fprintf(fileID,read)*, ktorá má parametre *fileID* kde sa nachádza zlúčená získaná cesta a názov súboru pomocou funkcie *fullfile*. Druhý parameter slúži k zápisu súboru vid', Výpisok 4.4.

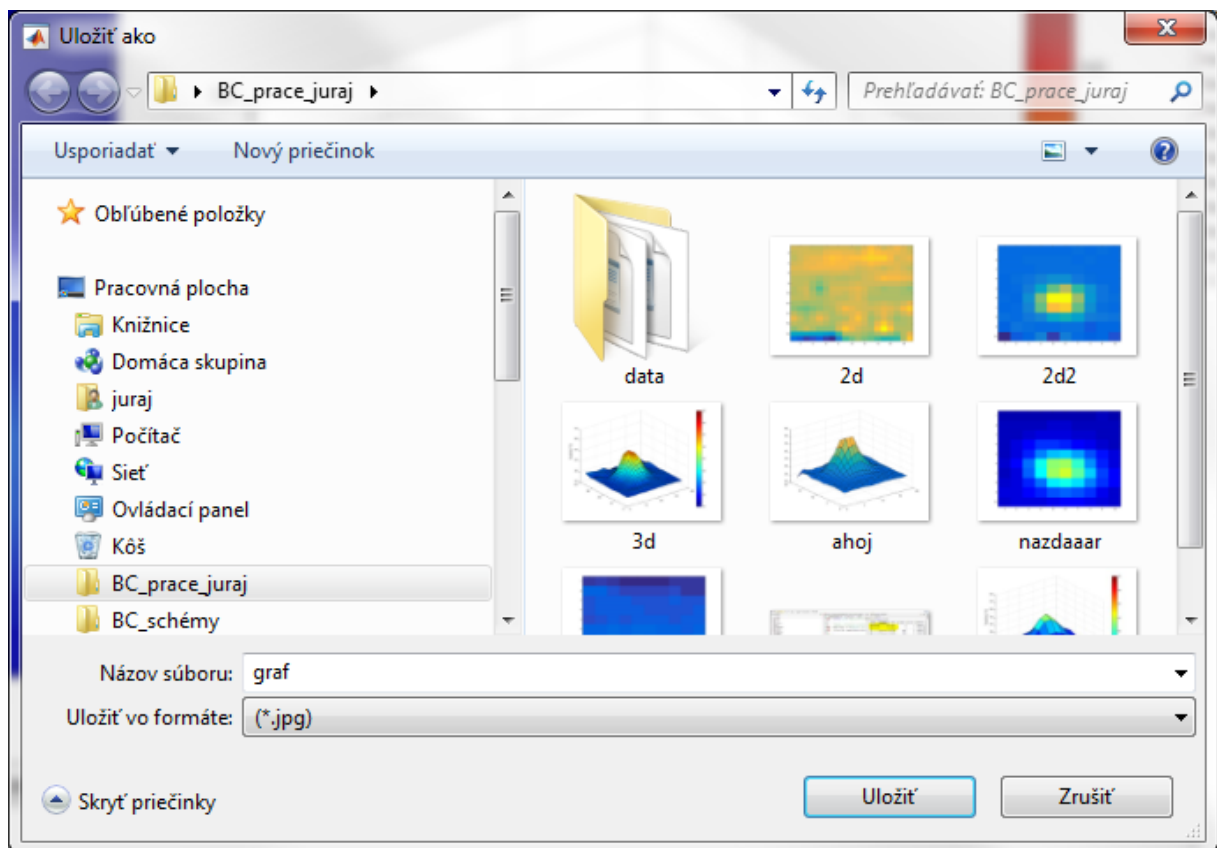
```
global path;
path_to_save=uigetdir();
MyDirInfo_new = dir(fullfile(path, '*.ddf'));
file_count=length(MyDirInfo_new);

for i=1:file_count
    original_filename =MyDirInfo_new(i).('name');
    fid = fopen(fullfile(path,original_filename), 'r');
    read = fscanf(fid, '%c');
    fullpath = fullfile(path_to_save, original_filename);
    fileID = fopen(fullpath, 'w');
    fprintf(fileID, read);
end
```

Výpisok 4.4: Funkcia pre uloženie zoznamu.

### Uloženie 2D a 3D grafov (3)

Funkcia uloží práve vybraný 2D alebo 3D graf na miesto a s názvom, ktoré vyberieme v dialógovom okne vid'. obrázok 4.7.



Obrázok 4.7: Výber priečinka a názvu súboru.

Pre otvorenie dialógového okna bola využitá funkcia `uiputfile()`, ktorá má parametre prípon súborov v ktorých môžeme graf uložiť ako (.jpg, .png, .tif, .bmp, .svg, .eps). Táto funkcia dokáže zistiť cestu kam chceme súbor uložiť ale aj názov súboru. Pre uloženie grafu je využívaná funkcia

*saveas(f,fullfile(PathName, FileName))*), ktorá ma ako prvý parameter graf ktorý chceme uložiť a ako druhý parameter získanú cestu a názov súboru zlúčené pomocou funkcie *fullfile* vid' Výpisok 4.5.

```
[FileName, PathName]=uinputfile({'*.jpg'; '*.png'; '*.bmp'; '*.tif'; '*.eps';  
 '*.svg'}, 'Uložiť ako'); %Získanie cesty a názvu súboru  
%{  
    Skupina príkazov  
%}  
saveas(f,fullfile(PathName, FileName)); %Uloženie grafu
```

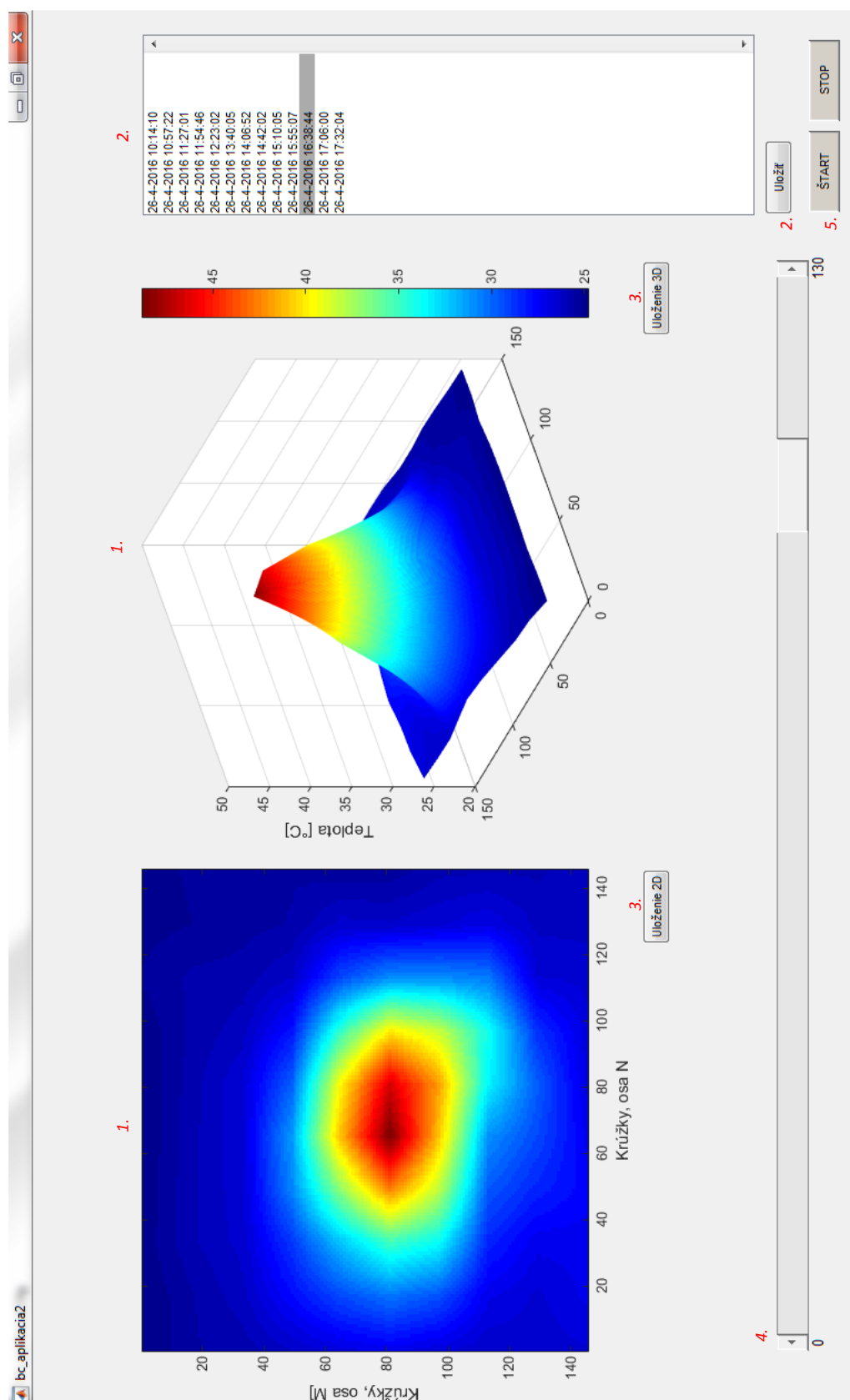
Výpisok 4.5: Získanie cesty, názvu a uloženie grafu.

### Posuvník (4)

Funkcia posuvníku slúži pre výber súboru zo zoznamu a pre jeho vykreslenie. Pod posuvníkom s nachádzajú dve políčka kde sa zobrazuje celkový čas merania. Od nuly až po čas posledného pribudnutého súboru.

### Tlačidlá ŠTART a STOP (5)

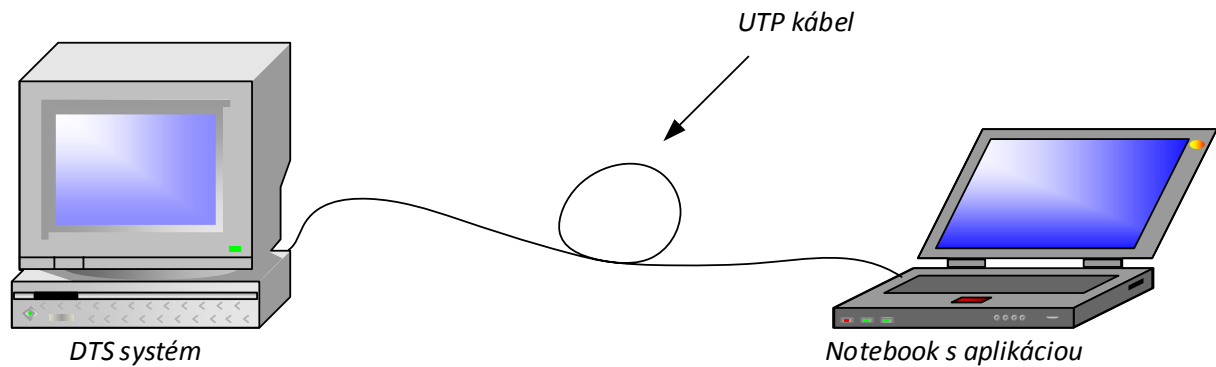
Tieto dve tlačidlá slúžia na zastavenie programu slúži tlačidlo Stop a na jeho znovu spustenie slúži tlačidlo Štart.



Obrázok 4.8: Druhé okno aplikácie.

## 4.2 Sieťové spojenie s DTS systémom

Ako jedná z hlavných požiadaviek na aplikáciu bola jej schopnosť snímať v reálnom čase namerané dáta DTS systémom. Takže muselo byť zabezpečené sieťové spojenie medzi počítačom a DTS systémom vid'. obrázok 4.9. Ale taktiež aj navrhnuť algoritmus pre neustále sledovanie priečinka v systéme DTS, do ktorého pribúdali nové namerané súbory.



Obrázok 4.9: Základná schéma sieťového zapojenia.

Pre neustále sledovanie priečinka bol zvolený nekonečný cyklus *while*, ktorý beží stále dookola až sa program nezastaví tlačidlom Stop. Do štruktúry *MyDirInfo* sú načítavané všetky súbory z priečinka, ku ktorému zadal cestu užívateľ. Následne je získaná veľkosť štruktúry a uložená do premennej *file\_new*. Podmienkou *If* je kontrolované či nepribudol nový súbor v priečinku teda v štruktúre *MyDirInfo*. Ak pribudol a podmienka bude splnená tak sa vykoná sled príkazov a na konci sa priradí do *file\_old* hodnota *file\_new*.

```
global stp_btn;
stp_btn=0;

while 1
    pause(0.05);

    if stp_btn == 1
        break;
    end

    MyDirInfo_new = dir(path);
    file_new = length(MyDirInfo_new);

    if file_new > file_old
        %{
            Skupina príkazov
        %}
        file_old = file_new ;
    end
end
```

Výpisok 4.6: Ukážka kódu pre sledovanie priečinka.

## 5 Konštrukcia sietí z optických vlákien

Ďalšou úlohou v bakalárskej práci bolo skonštruovať sieť z optických vlákien. Tieto siete boli vyrobené dve, jedna z optického vlákna s primárnou ochranou a druhá z optického vlákna so sekundárnou ochranou. Siete sa ďalej využívali na rôzne porovnávajúce merania podľa zadania vedúceho práce ale aj na overenie funkčnosti aplikácie popísanej v štvrtej kapitole.

### 5.1 Postup prípravy sietí

Ako prvé boli pripravené dve mriežky zo železa, ktoré boli nastriekané farbou vid'. obrázok 5.1. Tieto siete mali rozmer 10 políčok na šírku a 10 na výšku, pričom veľkosť jedného políčka bola 4,5x4,5cm. Takže bolo potrebné do siete namotať sto krúžkov plus sa muselo ešte namotať šesť kalibračných krúžkov, ktorých význam je bližšie vysvetlený v nasledujúcej šiestej kapitole.



Obrázok 5.1: Podklad pre namotanie sietí.

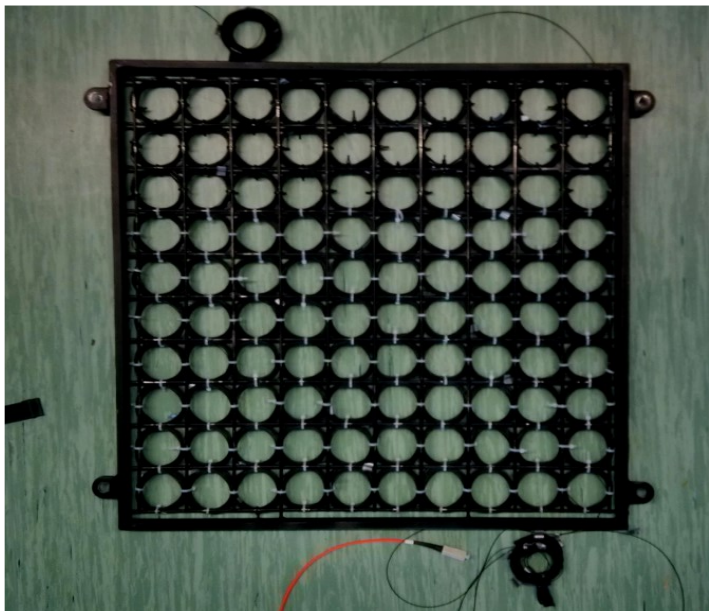
Bola zvolená metóda namotávania optického vlákna do krúžkov kvôli systému DTS. Ten berie dáta z určitého úseku vlákna a výslednú hodnotu za tento úsek spriemeruje. Dĺžku priemerovaného úseku volíme v DTS systéme. Môžu to byť hodnoty napríklad 1,02m, 2,03m, 3,05m, 4,06m, 5,08m a 6,09m atď. Vybrané boli dve mnoho vidové vlákna, jedno so sekundárnou a druhé s primárnou ochranou. Podrobnejší popis a parametre oboch vlákien sa nachádzajú v Tabuľke 5.1. Mnoho vidové vlákno bolo používané, pretože DTS systém meria pomocou mnoho vidových vlákien.

Názov vlákna	MM 50/125/245	LGBF-1BM-PK
Typ ochrany	primárna	sekundárna
Útlm 850/1300nm [dB/km]	2,13/0,455	3,02/1,030
Priemer jadra [μm]	50	50

Tabuľka 5.1: Katalógové parametre optických vlákien.

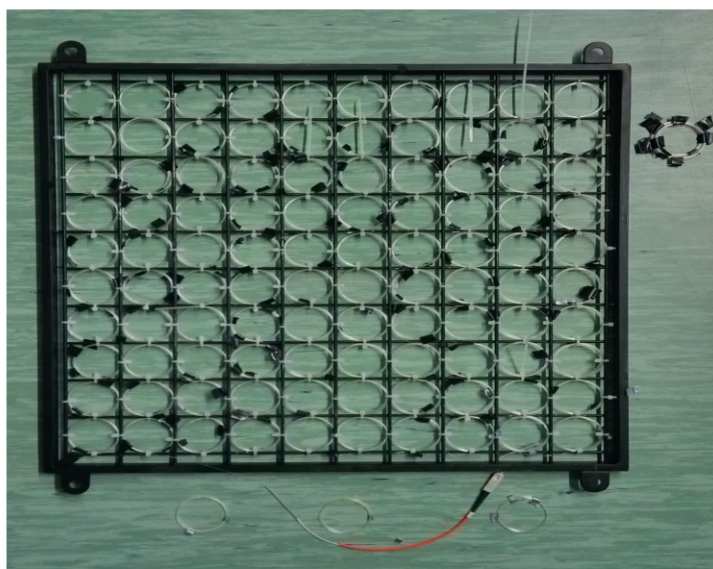


Najskôr bolo namotávané optické vlákno LGBF-1BM-PK so sekundárnou ochranou. Vlákno bolo namotávané do krúžkov, pričom jeden krúžok mal 5,08m. Namotanych stošesť krúžkov s priemerom 4,5cm, ktoré boli postupne upevňované pomocou plastových sťahovacích pásov na vopred pripravenú železnú sieť vid'. obrázok 5.2. Namotávanie vlákna aj samotne prichytávanie vlákna na sieť prebehlo v poriadku bez zvarov, väčších ohybov a komplikácii pri príprave siete.



Obrázok 5.2: *Pripravená sekundárna sieť.*

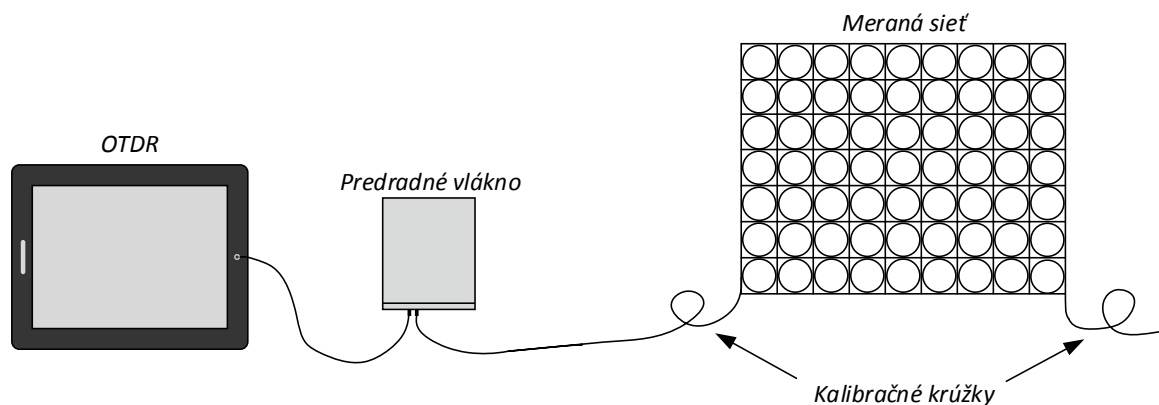
Druhú sieť bola pripravená z optického vlákna MM 50/125/245 s primárnou ochranou postup bol rovnaký ako pri vlákne so sekundárnou ochranou. Takže bolo znova namotanych stošesť krúžkov, ktoré boli postupne upevňované na pripravenú podkladanú sieť vid'. obrázok 5.3. Príprava tejto siete však neprebehla bez problémovo a bez komplikácií. Sieť sa podarilo dokončiť až na niekoľký pokus. No na sieti sa nachádzajú dva zvary a niekoľko ohybov, ktoré zväčšujú útlm a nepresnosť pri meraní siete.



Obrázok 5.3: *Pripravená primárna sieť.*

## 5.2 Meranie sietí OTDR

Skôr ako sa siete s kalibrovali a použili k meraniam, tak boli premerané systémom OTDR. Kde boli zistené parametre ako celková dĺžka optického vlákna namotaného v jednotlivých sieťach. Ako aj charakteristika útlmu meracej časti siete pre vlnové dĺžky 850nm a 1300nm. Medzi prístroj OTDR a meranú sieť bolo ešte pripojené predradné vlákno o dĺžke 213 metrov. Predradné vlákno sa používa kvôli odstráneniu mŕtvej zóny prístroja OTDR.



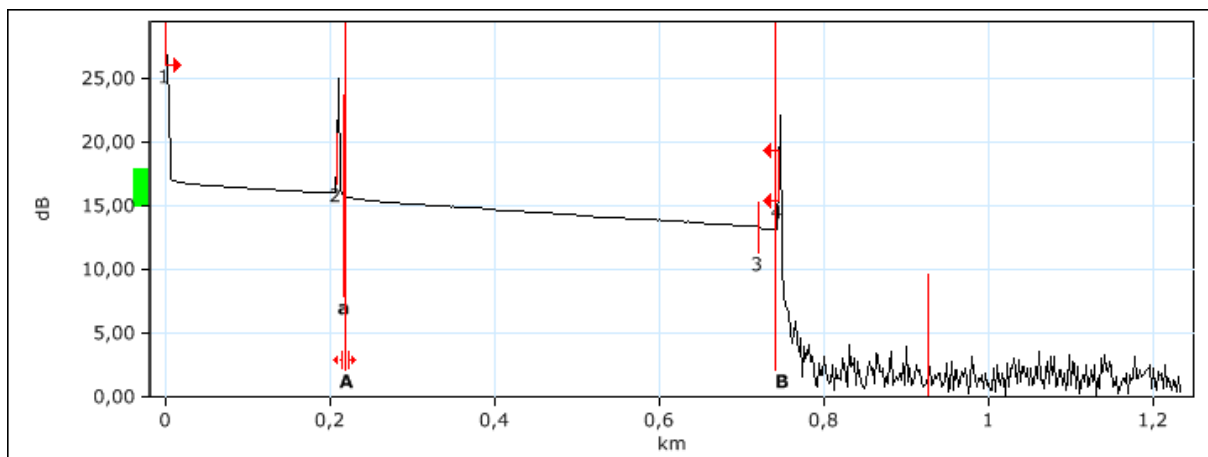
Obrázok 5.4: Meranie sietí pomocou OTDR.

### 5.2.1 Sekundárna sieť

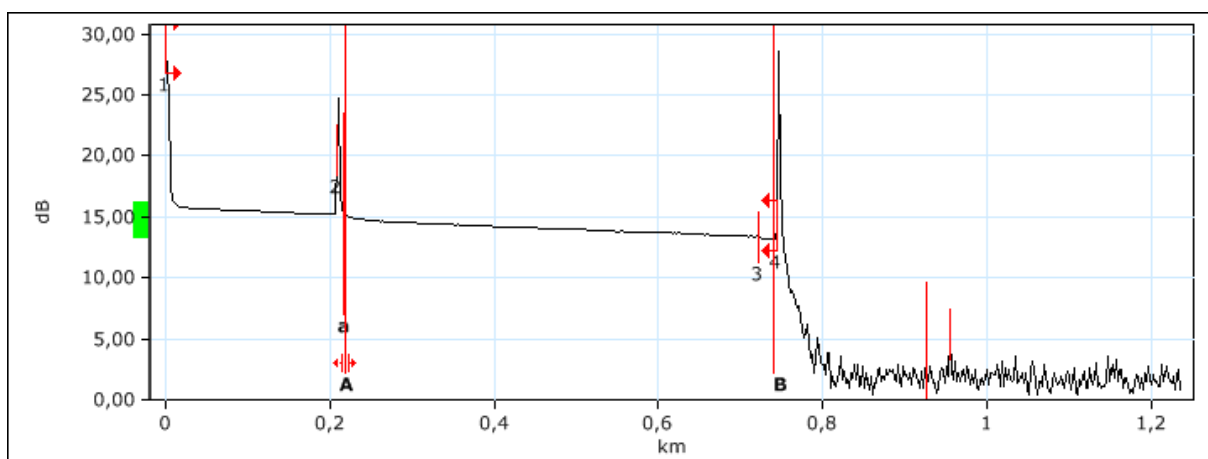
Ako prvá bola premeraná meracia sieť z optického vlákna LGBF-1BM-PK so sekundárnou ochranou. Tato sieť nemala žiadne vážnejšie chyby ako zvary alebo väčšie ohyby na trase. Preto sa očakával priaznivý výsledok z merania OTDR. Čo sa aj naplnilo a jednotlivé namerané hodnoty ODTR môžeme vidieť v Tabuľke 5.2. Ako aj graf charakteristiky útlmu pre vlnové dĺžky 850nm (vid'.obrázok5.5) a 1300nm (vid'. obrázok 5.6).

LGBF-1BM-PK		
Vlnová dĺžka [nm]	850	1300
Dĺžka trasy [km]	0,5228	0,5228
Útlm trasy [dB]	2,649	1,930
Merný útlm trasy [dB/km]	5,068	3,691

Tabuľka 5.2: Hodnoty namerané ODTR (sekundár).



Obrázok 5.5: Graf útlmovej charakteristiky pre vlnovú dĺžku 850 nm (sekundár).



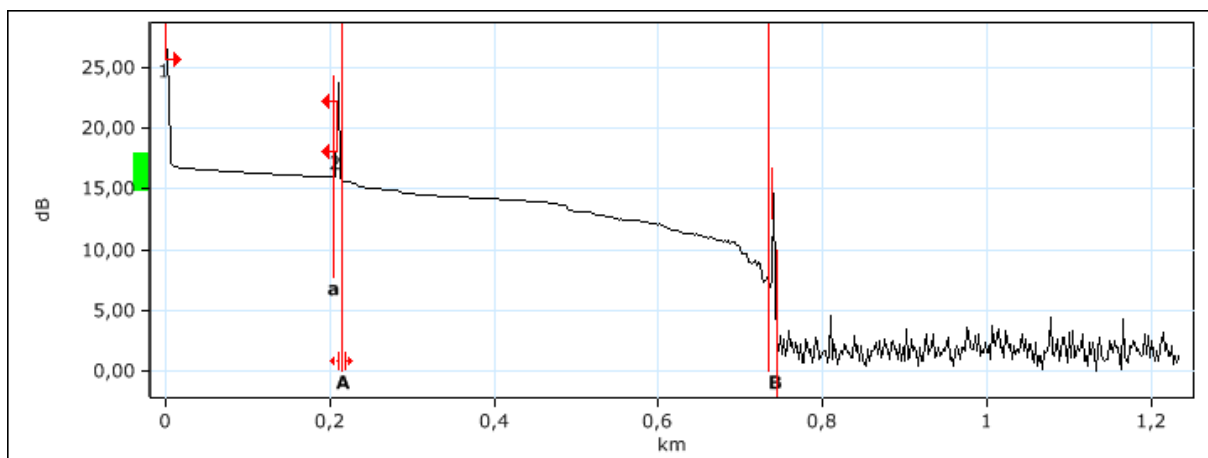
Obrázok 5.6: Graf útlmovej charakteristiky pre vlnovú dĺžku 1300 nm (sekundár).

### 5.2.2 Primárna sieť

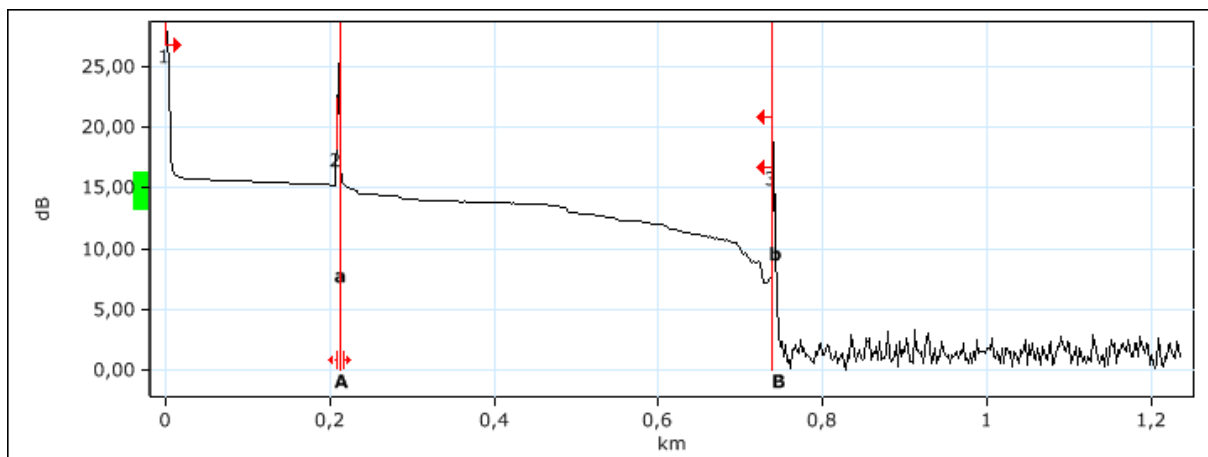
Ako druhá bola premeraná sieť z optického vlákna MM 50/125/245 s primárnou ochranou. Táto sieť mala na svojej trase dva zvary a niekoľko ohybov. Čo sa aj prejavilo na nameranom útlme pomocou prístroja OTDR. Jednotlivé hodnoty namerané OTDR prístrojom môžeme vidieť v Tabuľka 5.3. Tak isto ja útlmové charakteristiky pre vlnové dĺžky 850nm (viď. obrázok 5.7) a 1300nm (viď. obrázok 5.8)

MM 50/125/245		
Vlnová dĺžka [nm]	850	1300
Dĺžka trasy [km]	0,5208	0,5208
Útlm trasy [dB]	8,264	4,137
Merný útlm trasy [dB/km]	15,873	7,863

Tabuľka 5.3: Hodnoty namerané ODTR (primár).



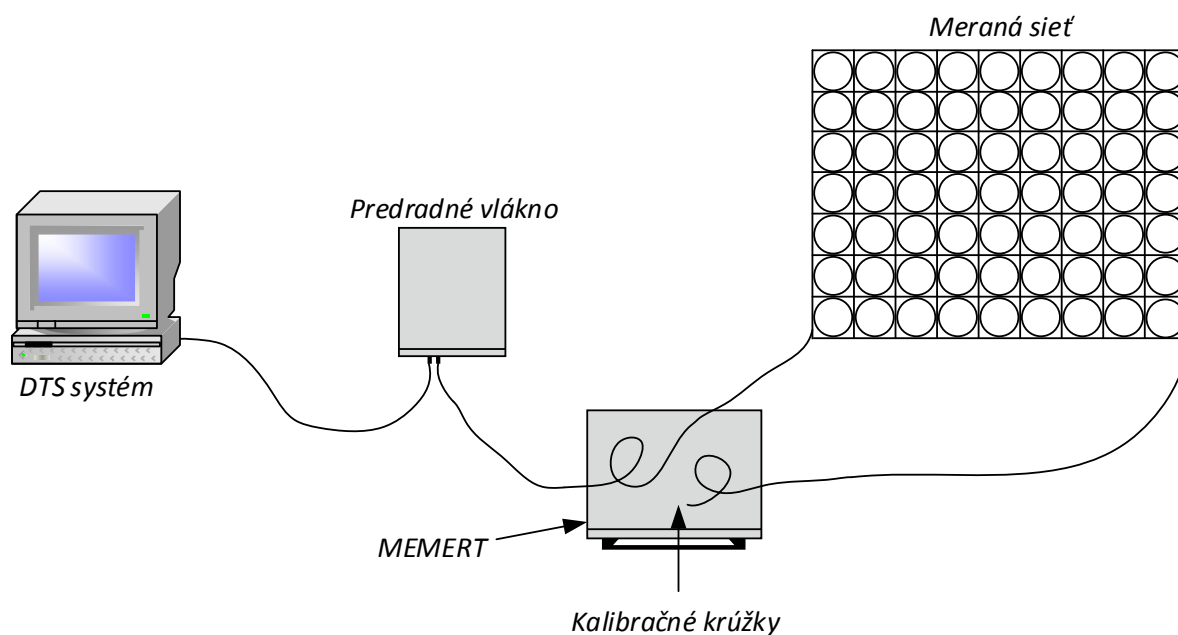
Obrázok 5.7: Graf útlmovej charakteristiky pre vlnovú dĺžku 850 nm (primár).



Obrázok 5.8: Graf útlmovej charakteristiky pre vlnovú dĺžku 1300 nm (primár).

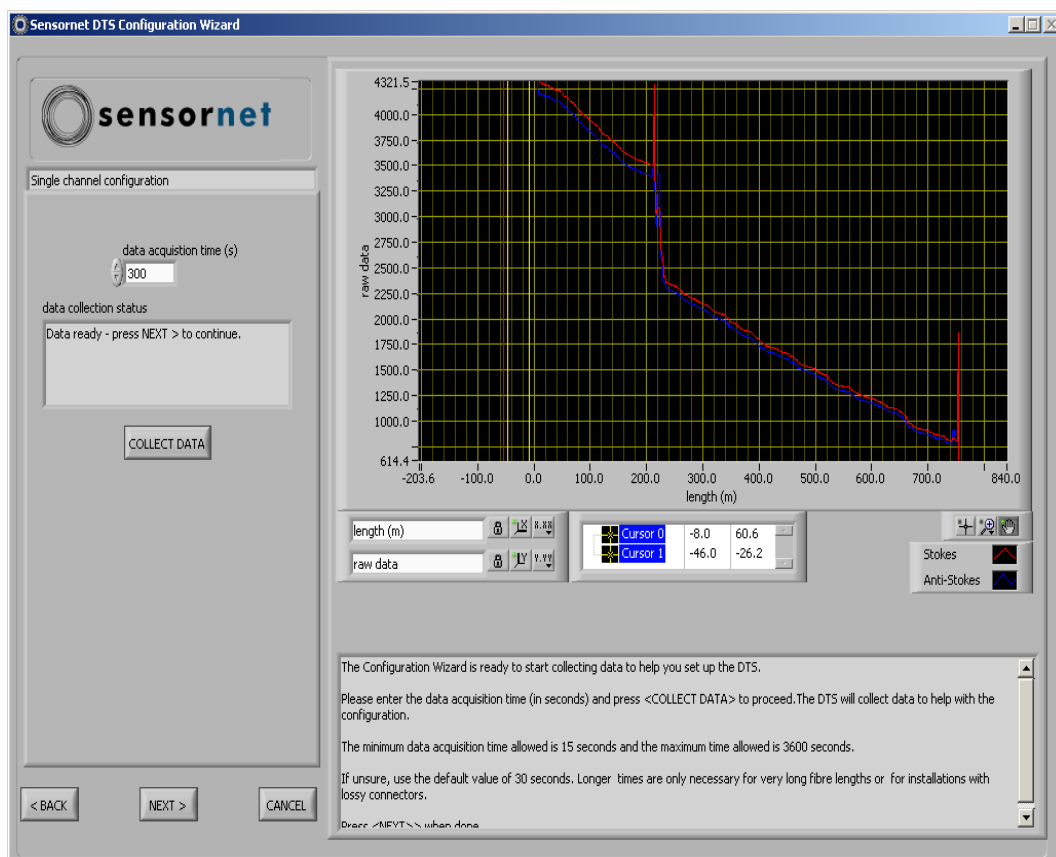
## 6 Kalibrácia sietí

Skôr ako sa začalo s pripravenými sieťami merať musela byť vykonaná kalibrácia systému DTS. Kalibrácia DTS systému je dôležitá pre správne výsledky meraní. Hlavnou úlohou kalibrácie je vyrovnať Stokes a anti-Stokes časť Ramanovko rozptylu. Kalibrácia sa prevádza pomocou konfiguračného sprievodcu systému DTS, ktorého kroky sú bližšie popísané v ďalšej podkapitole. Pre kalibráciu sa využíva špeciálna teplotná komora (pec), alebo lázeň s presným odpočtom teploty (MEMERT). Do ktorých sa vložia kalibračné krúžky z oboch strán siete. A nastaví sa na nich referenčná teplota.



Obrázok 6.1: Schéma zapojenia kalibrácie.

## 6.1 Popis kalibrácie pre siete

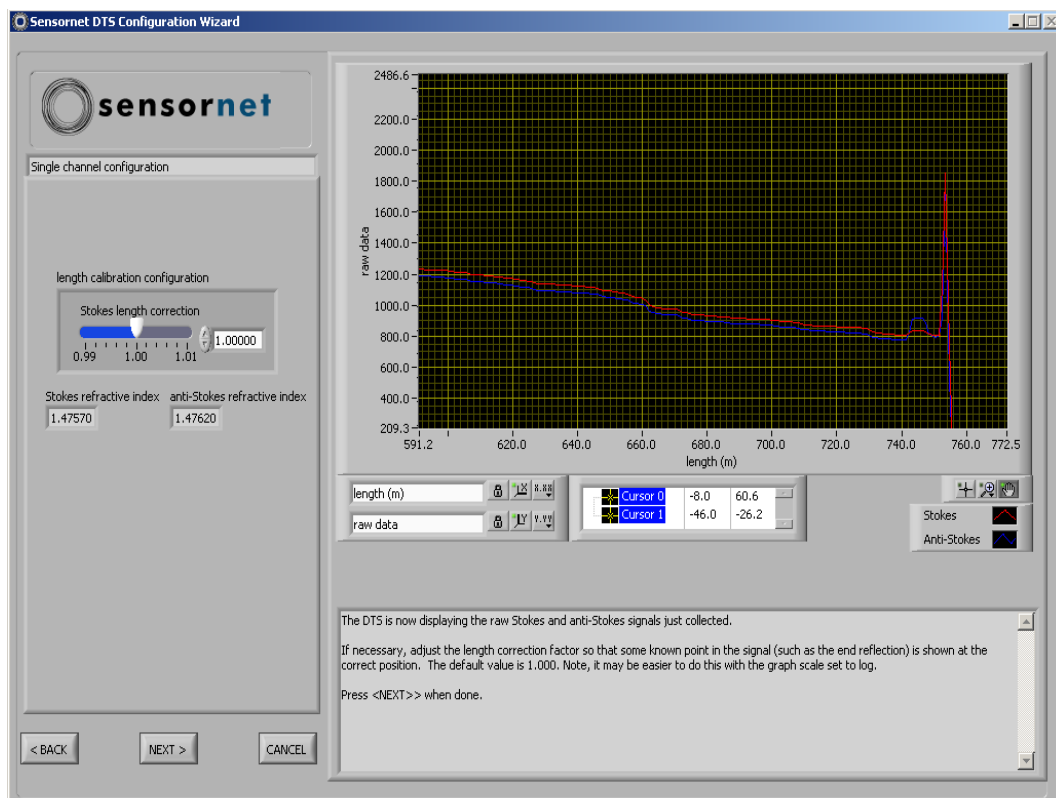


Obrázok 6.2: Nastavenie zberu dát a priemerovanie.

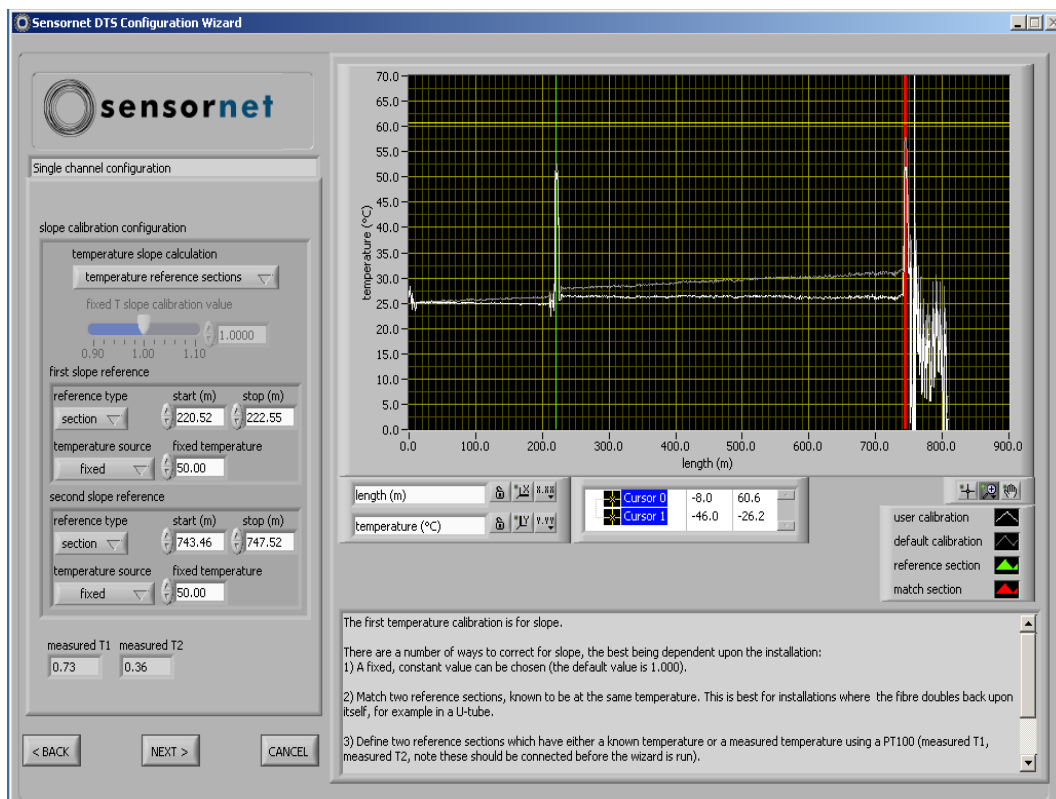
Ako je vyššie spomenuté kalibrácia je veľmi dôležitou časťou pri správnom meraní. Preto sa pre obe siete použila rozdielna konfigurácia aby boli výsledky čo najpresnejšie. Pre kalibráciu bol použitý prístroj MEMERT. Na ktorom sa nastavila referenčná teplota. Do prístroja MEMERT sa ponoril krúžok na začiatku ale aj na konci sietí. Čím bola použitá metóda nastavenia fixnej hodnoty teploty na oboch stranách sietí. Teplota na začiatku a na konci siete vystúpila približne k 50°C. To umožnilo určiť presnú dĺžku meranej trasy

V nasledujúcom kroku bol spustený konfiguračný sprievodca, ktorý sa nachádza v programe Sensornet DTS. Sprievodca sa využíva pre vytvorenie nového konfiguračného súboru systému DTS. Konfigurácia obsahuje dvanásť kľúčových krokov. Pre správne nakonfigurovanie systému DTS musí byť každý z týchto krokov kompletný.

Sprievodca umožňuje načítať aj staršie konfigurácie, ktoré môžeme podľa potreby upravovať. Po zadaní konfiguračného mena a nastavenia ukladania nameraných súborov. Nasledoval krok, v ktorom bola nastavovaný čas zberu a priemerovanie dát. Čím je nastavená dlhšia doba zberu a priemerovania dát tým bude kalibrácia DTS systému presnejšia. Prípade oboch sietí bola táto doba nastavená na päť minút vid' obrázok 6.2. V ďalšom kroku sa nastavovalo vyrovňavanie Stokes a anti-Stokes ako môžeme vidieť na obrázku 6.3. Vyrovňavanie týchto častí slúži k presnému odpočtu teploty.

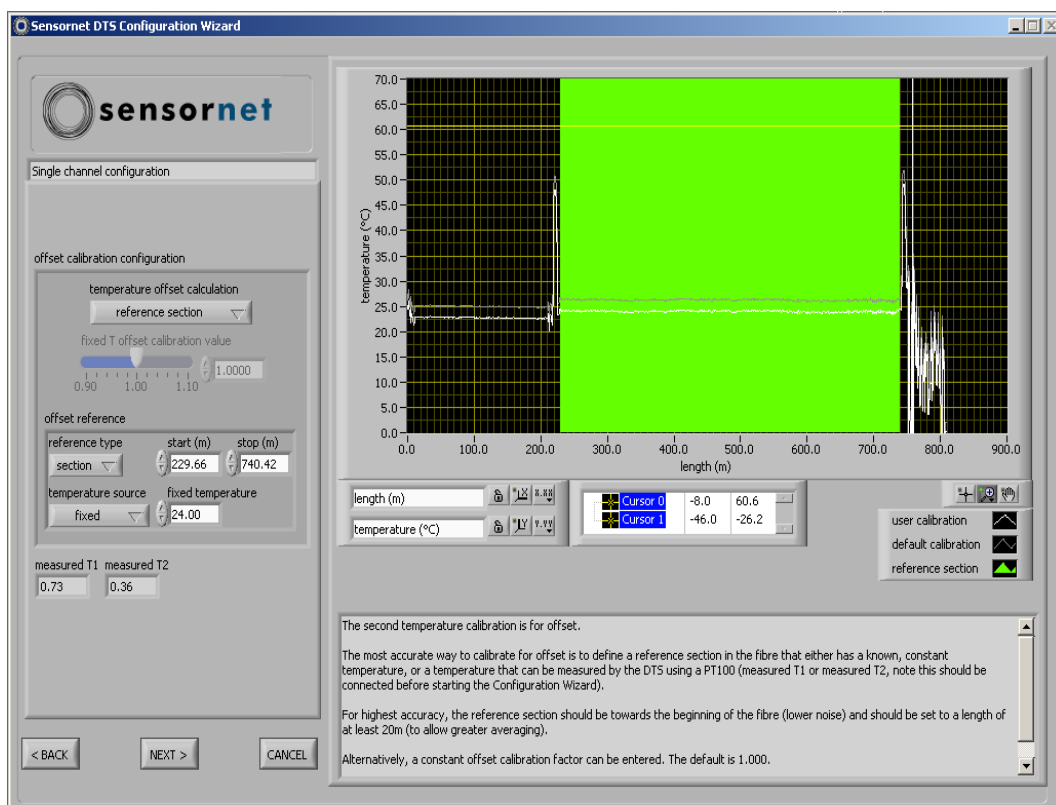


Obrázok 6.3: Vyrovnanie Stokes a anti-Stokes časti.



Obrázok 6.4: Nastavenie teplotnej referencie kalibračných krúžkov na začiatku a konci siete.

Na obrázku 6.4 môžeme vidieť nastavovanie teplotnej referencie kalibračných krúžkov. V tomto kroku sa nastavuje presne umiestnenie kalibračných krúžkov na začiatku aj na konci siete a ich referenčná teplota. Nasledovalo nastavenie presnej dĺžky meranej trasy. Jej začiatok a koniec a aktuálnu teplotu v miestnosti, ktorá bola odmeraná teplotnou sondou. Nastavenie tejto časti môžeme vidieť na obrázku 6.5. Na koniec bola ešte nastavená doba merania na 10 sekúnd. Takže každých 10 sekúnd pribudne v priečinku nový súbor s nameranými hodnotami.

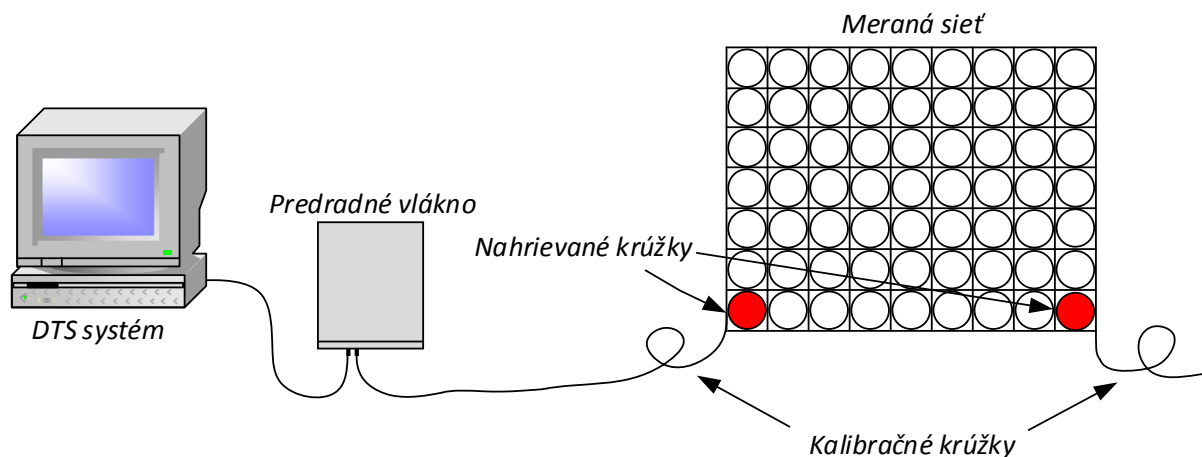


Obrázok 6.5: Nastavenie rozsahu merania.

## 6.2 Kontrola kalibrácie

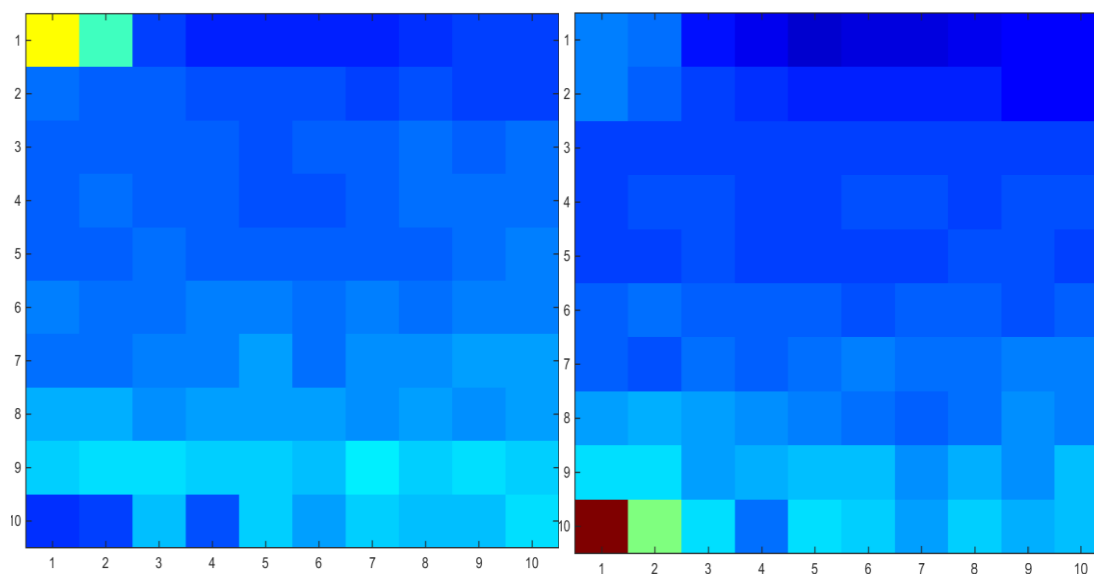
Po kalibrácii systému DTS sa uskutočnili prvé merania. Tieto merania mali ukázať správnosť kalibrácie, ktorá bola nastavovaná. Meranie sa uskutočnilo na oboch sieťach. Každá sieť s jej vlastnou kalibráciou. Schému merania môžeme vidieť na obrázku 6.6. Za systém DTS bolo zapojené predradné vlákno, ktoré bolo spojené s meranou sieťou. Princíp spočíval v tom že na vstup aj výstup bola priložená testovacia PET fľaša s horúcou vodou a na 2D grafe bolo možné sledovať či sa zvyšuje teplota na začiatku a na konci siete.



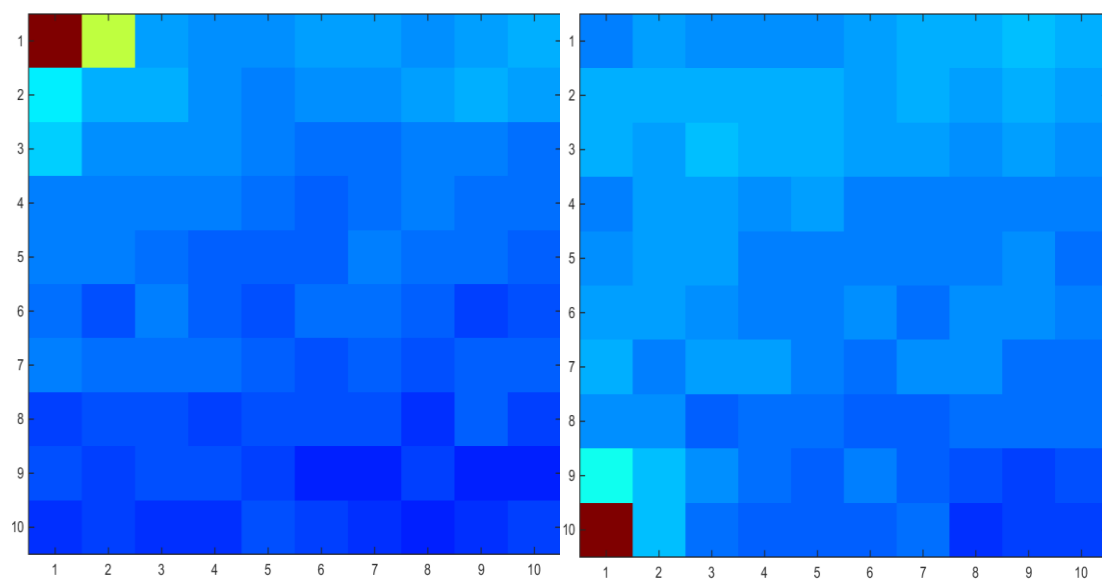


Obrázok 6.6: Schéma zapojenia testovania kalibrácie.

Ako môžeme vidieť na obrázkoch nižšie kalibrácia dopadla úspešne a vždy sa zohrial prvý a posledný krúžok siete. PET fľaša ktorá bola použitá pri meraní nahriala aj krúžky okolo ale už nie tak výraznou teplotou ako tie na ktorých bola položená.



Obrázok 6.7: Kontrola kalibrácie primárnej siete.



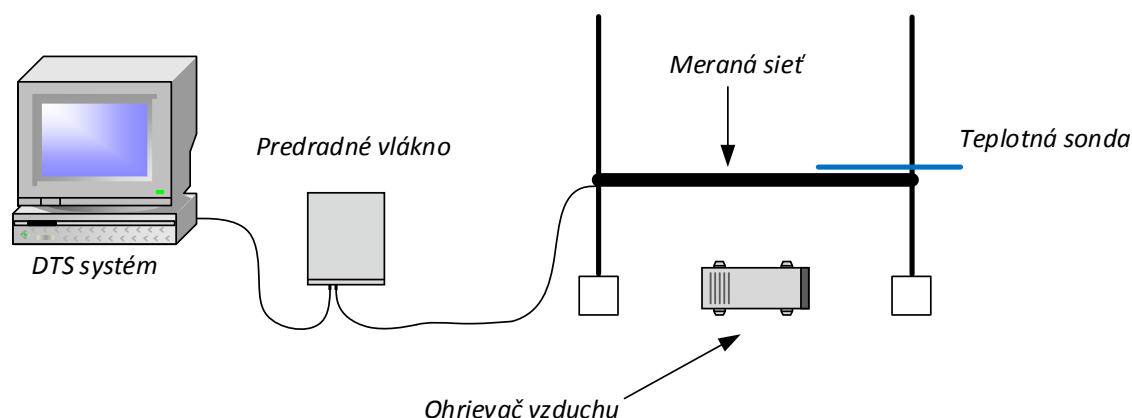
Obrázok 6.8: *Kontrola kalibrácie sekundárnej siete.*

## 7 Výsledky meraní

Merania boli prevádzkané za pomoci dvoch vyrobených sietí. Jedna sieť bola vyrobená z optického vlákna s primárnou ochranou. Druhá bola vyrobená z optického vlákna so sekundárnou ochranou. Merania boli robené podľa zadaných vstupných a výstupných parametrov vedúceho práce. Pri meraniach bolo možné pozorovať rozdiely medzi jednotlivými typmi sietí. Výsledky meraní a pozorovaní boli vyhodnotené v závere každého z meraní.

### 7.1 Meranie za pomoci ohrievača Solac TH 8325

Princíp tohto merania spočíval v tom že v strede pod sieťou bol pripravený ohrievač Solac TH 8325, ktorý fúkal teplý vzduch na sieť. Ohrievač bol nastavený po celú dobu meraní na rovnakú hodnotu výkonu. Táto hodnota bola približne polovica výkonu ohrievača. Sieť bola umiestnená na posuvných tyčiach. Prvé meranie siete začalo v bode nula čiže tesne nad ohrievačom. Ďalších meraniach bol postup taký, že bola zvyšovaná výška siete nad ohrievačom. Vždy s krokom päť centimetrov až do výšky šesťdesiat centimetrov nad ohrievačom. Pričom ohrievač bol umiestnený stále na rovnakom mieste. Jednotlivé merania trvali 10 minút a teplota bola kontrolovaná pomocou presnej teplotnej sondy.



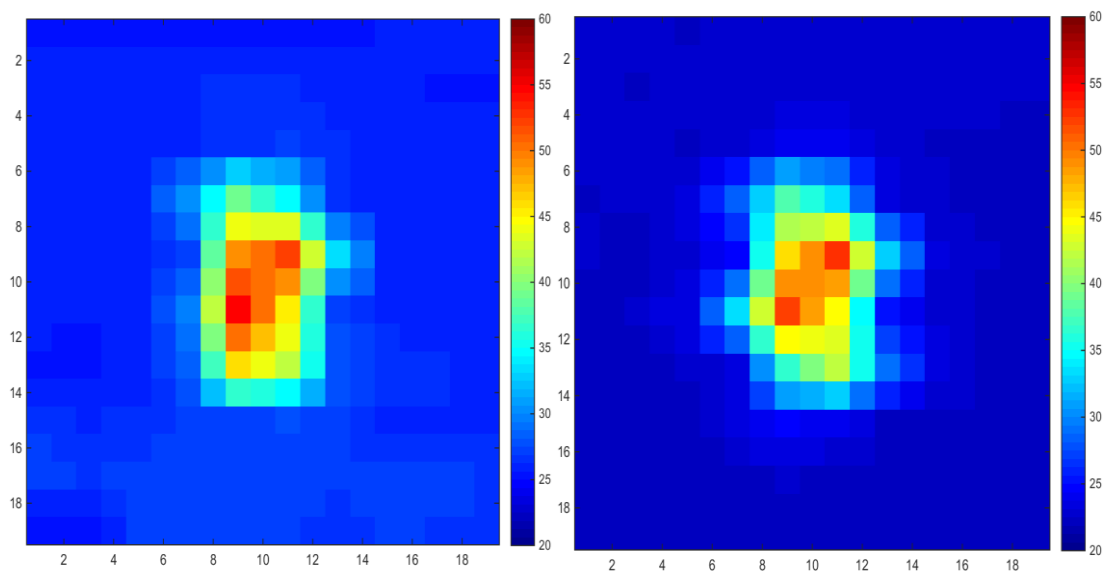
Obrázok 7.1: Schéma zapojenia merania ohrievača Solac TH 8325.

Zapojenie tohto merania môžeme vidieť na obrázku 7.1. Za systém DTS je zapojené predradné vlákno, ktorého parametre môžeme vidieť v Tabuľke 7.1. Predradné vlákno je spojené s meranou sieťou. Meraná sieť bola posúvaná po posuvných tyčiach. Pod sieťou sa nachádza ohrievač Solac TH 8325, ktorý je umiestnený v strede siete. Správne meranie je kontrolované presnou teplotnou sondou.

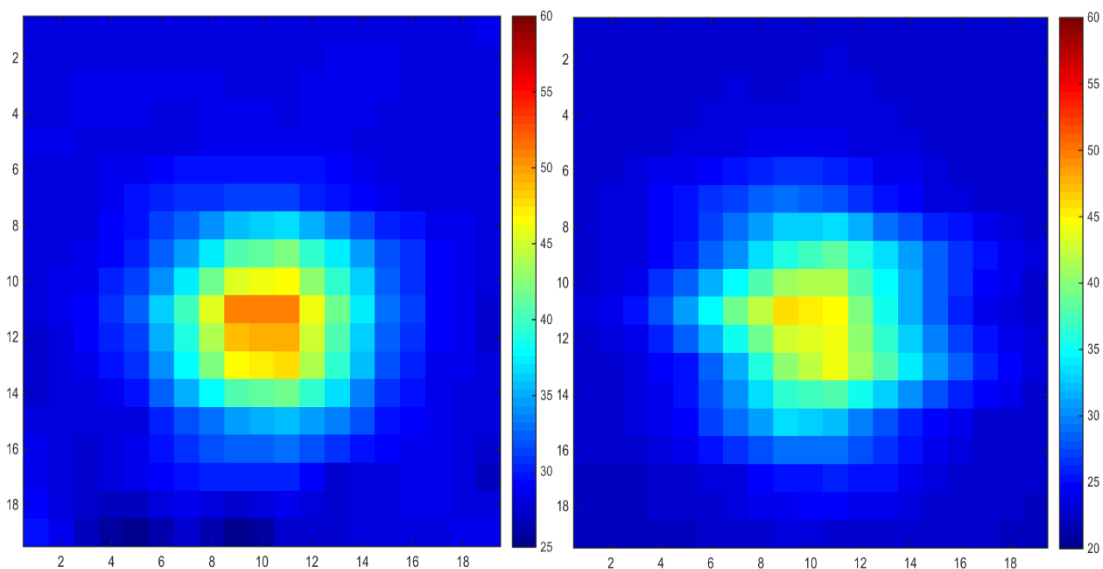
Predradné vlákno	
Dĺžka vlákna [m]	213
Útlm 850nm/1300nm [dB/km]	0,668/0,546
Použité vlákno	MM 50/125
Použité konektory	SC/PC

Tabuľka 7.1: Parametre predradného vlákna

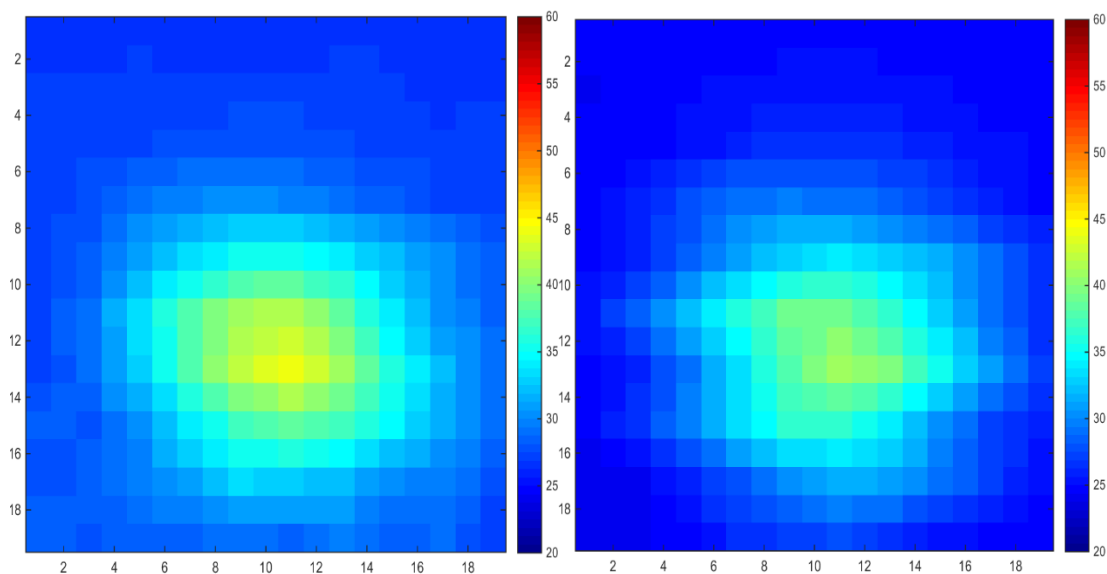
Výsledky meraní sú zobrazené v grafoch. Ako prvé môžeme vidieť porovnanie sietí s primárnou ochranou (vľavo) a sekundárnou ochranou (vpravo). Porovnanie je uskutočnené z meraní tesne nad ohrievačom, tridsať centimetrov nad ohrievačom a šesťdesiat centimetrov nad ohrievačom. Pri zobrazovaní grafov bola použitá interpolácia s hodnotou 1.



Obrázok 7.2: Porovnanie sietí tesne nad ohrievačom primárna ochrana(vľavo)a sekundárna ochrana(vpravo).

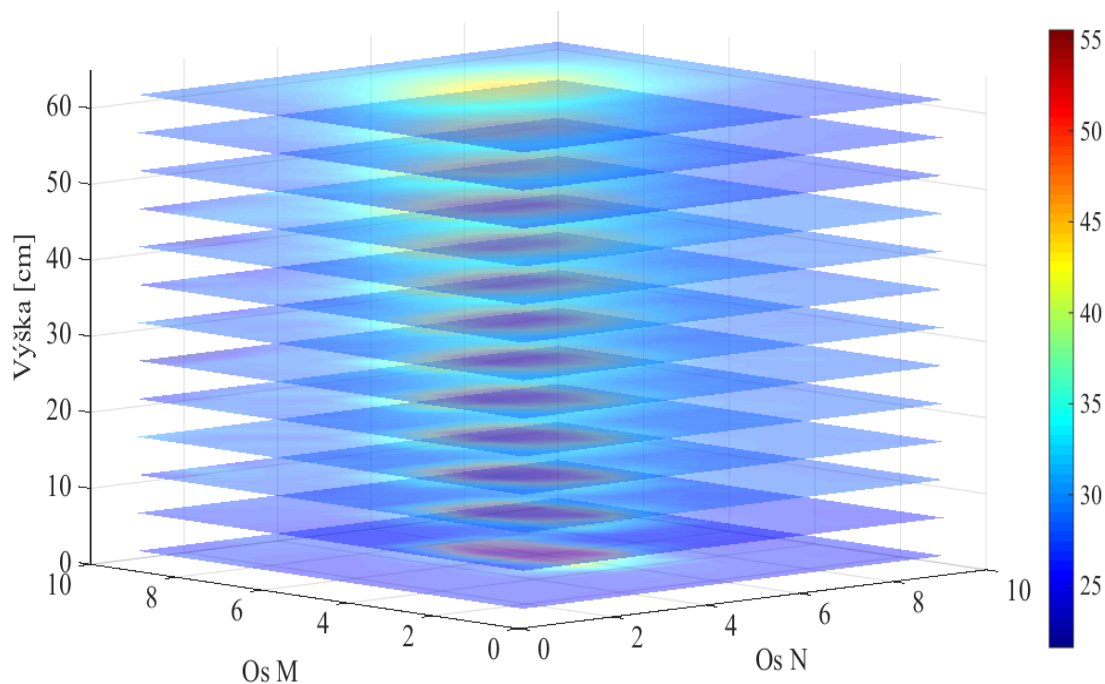


Obrázok 7.3: Porovnanie sietí tridsať centimetrov nad ohrievačom primárna ochrana(vľavo)a sekundárna ochrana(vpravo).

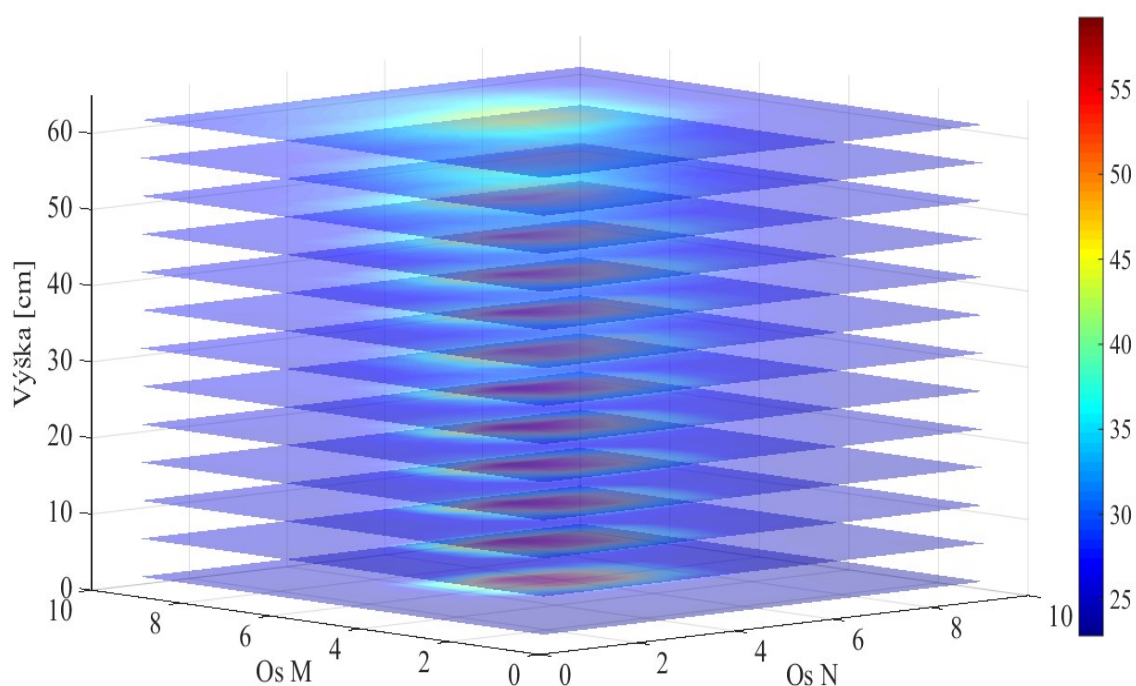


Obrázok 7.4: Porovnanie sietí šesťdesiat centimetrov nad ohrievačom primárna ochrana(vľavo)a sekundárna ochrana(vpravo).

V nasledujúcich dvoch 3D grafoch sú zobrazené merania teploty zo všetkých meraných výšok. Na obrázku 7.5 môžeme vidieť merania pomocou siete s primárnou ochranou a na obrázku 7.6 merania pomocou siete so sekundárnou ochranou.

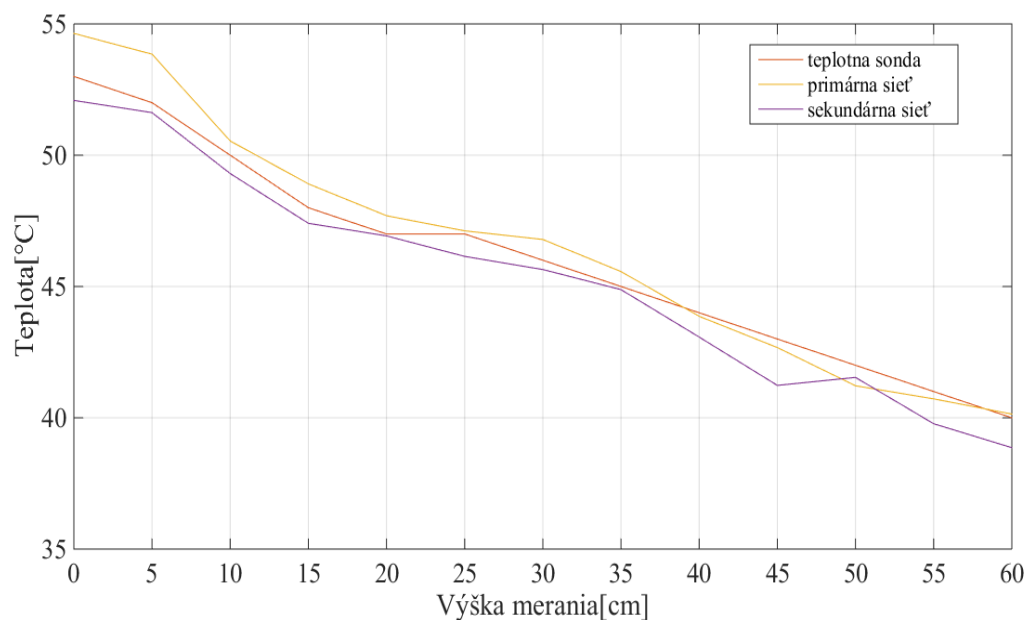


Obrázok 7.5: 3D graf s meraní teploty jednotlivých výšok s primárnou ochranou.



Obrázok 7.6: 3D graf s meraní teploty jednotlivých výšok so sekundárnou ochranou.

V poslednom grafe môžeme vidieť porovnanie hodnôt v jednotlivých výškach v tom istom bode. Nameraných pomocou oboch meracích sietí a meracej sondy.



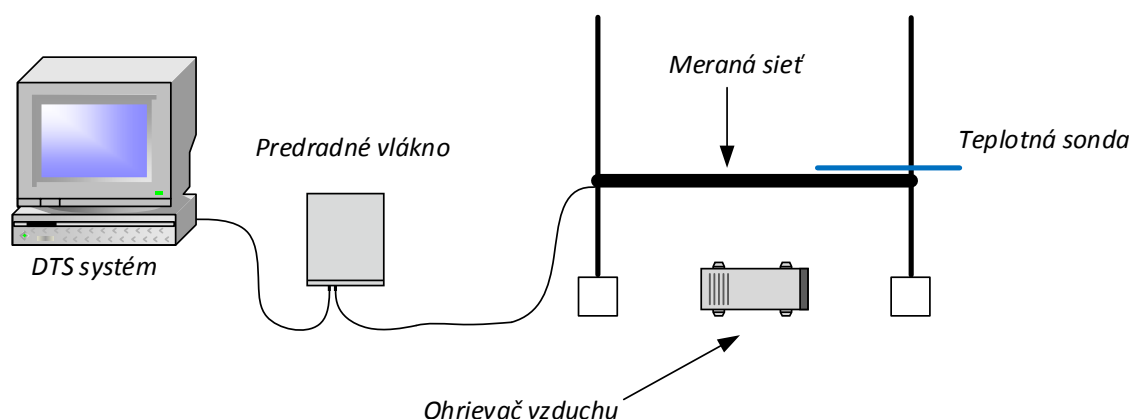
Obrázok 7.7: Porovnanie hodnôt v jednom meranom bode.

### Zhodnotenie merania

Meranie teploty pomocou ohrievača Solac TH 8325 na oboch meraných sieťach môžeme vidieť na rôznych grafoch vyššie. Z grafov môžeme vidieť, že čím vyššie bola sieť umiestnená tým bola hodnota teploty menšia no zároveň nahriala väčšiu plochu. Vo vrchných meraniach, ako môžeme vidieť na 2D a 3D grafoch, došlo k posunu od stredu siete. Čo mohlo byť spôsobené samotným ohrievačom, ktorý nefúkal vzduch kolmo na sieť. Ako môžeme vidieť z grafu porovnania hodnôt v jednom meranom bode merané siete sa približovali hodnotám referenčnej teplotnej sondy. Nepresnosti mohli byť spôsobené zlou kalibráciou alebo samotným DTS systémom, ktorý nie je v týchto teplotách úplne presný.

## 7.2 Meranie pomocou ohrievača Empire CTH-5000

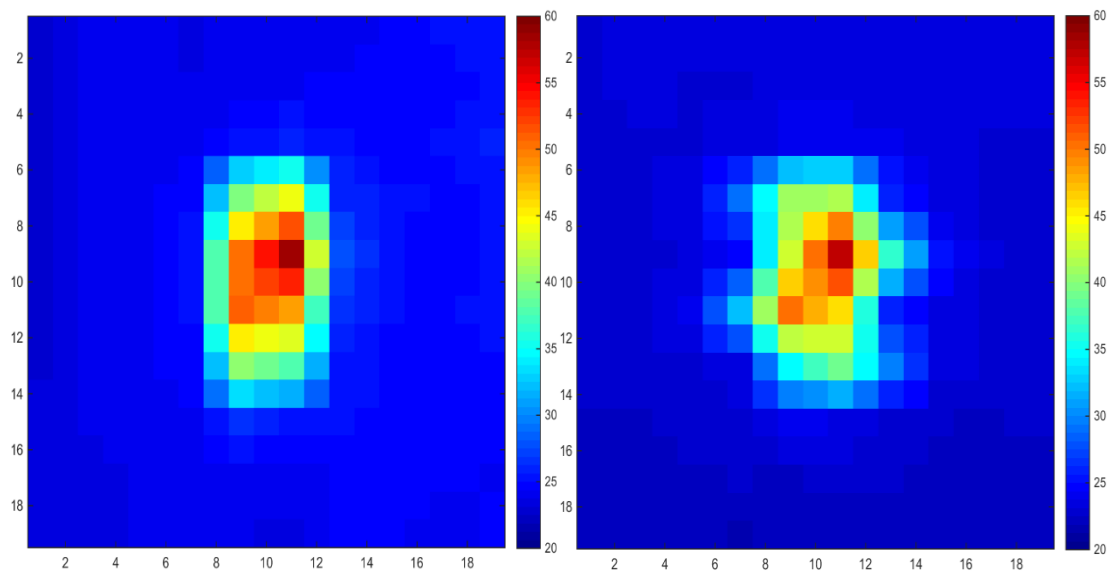
Meranie pomocou ohrievača Empire CTH-5000 bolo rovnaké ako meranie pomocou ohrievača Solac TH 8325. Takže pomocou ohrievača bol fúkaný teplý vzduch rovnakou intenzitou počas celého merania na sieť z optického vlákna. Ohrievač bol umiestnený uprostred pod sieťou a jeho výkon počas celého merania bol nastavený približne na polovicu. Opäť bola zvyšovaná výška siete nad ohrievačom od bodu nula takže tesne nad ohrievačom až po šesťdesiat centimetrov nad ohrievačom s krokom päť centimetrov.



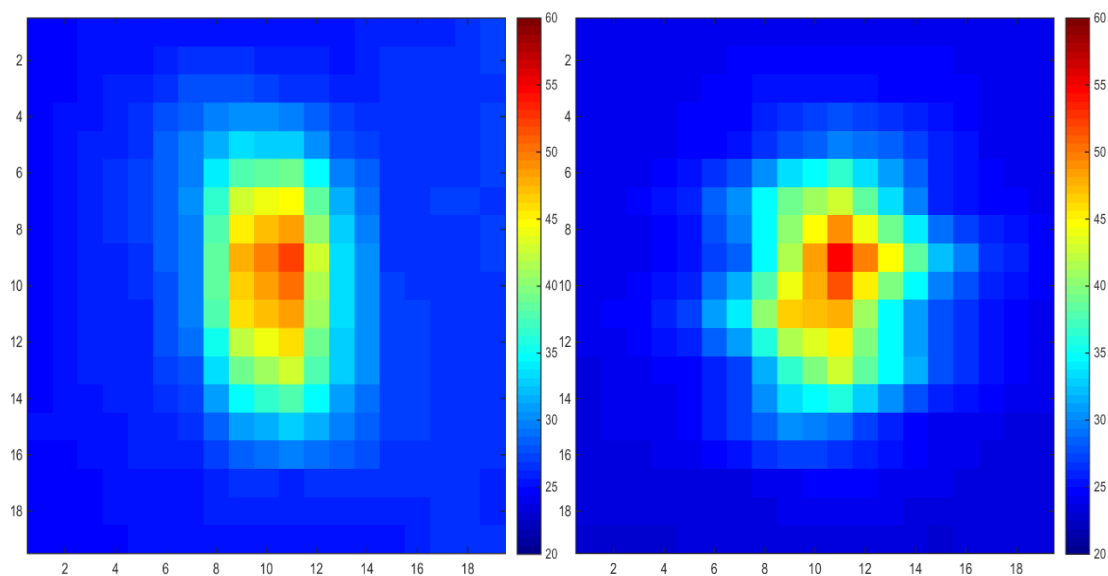
Obrázok 7.8: Schéma zapojenia merania ohrievača Empire CTH-5000.

Schéma zapojenia je totožná ako pri meraní ohrievača Solac TH 8325. Rovnako bolo za systém DTS zapojené predradné vlákno, ktoré bolo spojené s meranou sieťou. Pod ktorou bol v strede umiestnený ohrievač Empire CTH-5000. Teplota bola meraná aj teplotnou sondou.

Výsledky boli opäť vynesené do grafov. Ako prvé môžeme vidieť porovnanie primárnej a sekundárnej siete. Vo výškach tesne nad ohrievačom, tridsať centimetrov nad ohrievačom a šesťdesiat centimetrov nad ohrievačom. Pri zobrazovaní grafov bola použitá interpolácia s hodnotou 1.

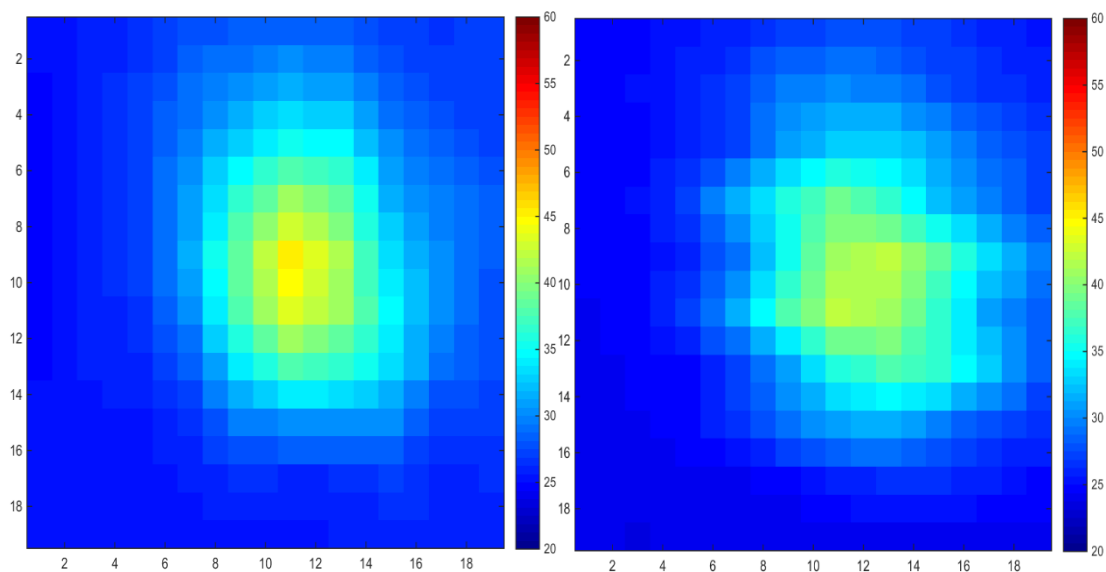


Obrázok 7.9: Porovnanie sietí tesne nad ohrievačom primárna ochrana(vľavo) a sekundárna ochrana(vpravo).



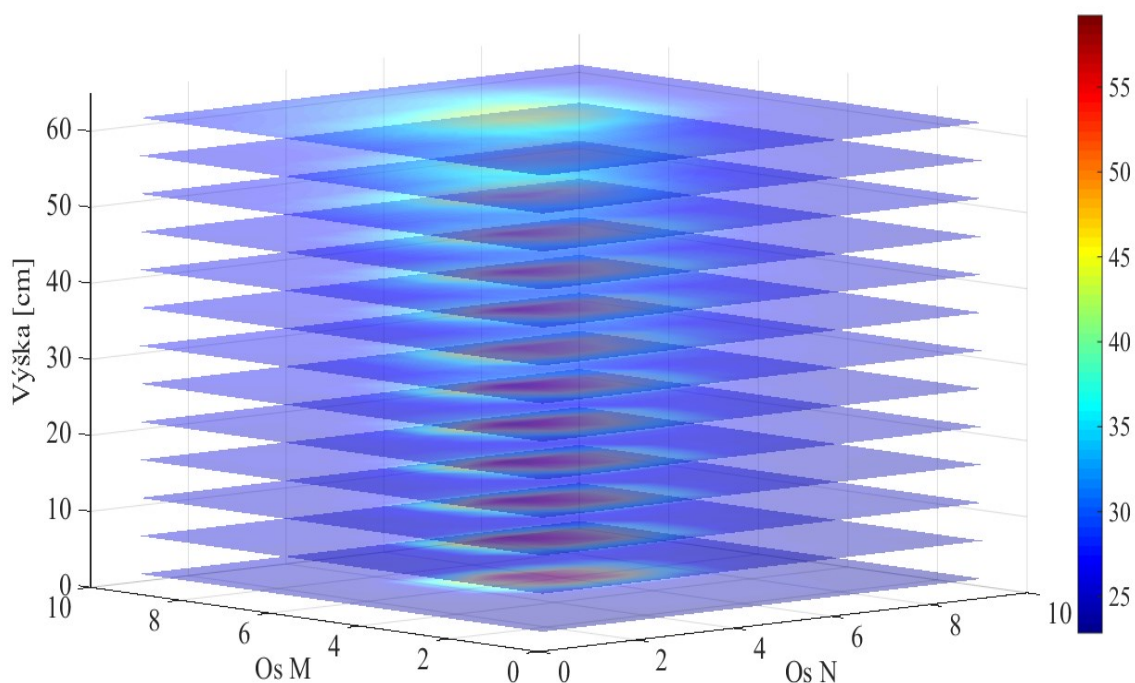
Obrázok 7.10: Porovnanie sietí tridsať centimetrov nad ohrievačom primárna ochrana(vľavo) a sekundárna ochrana(vpravo).



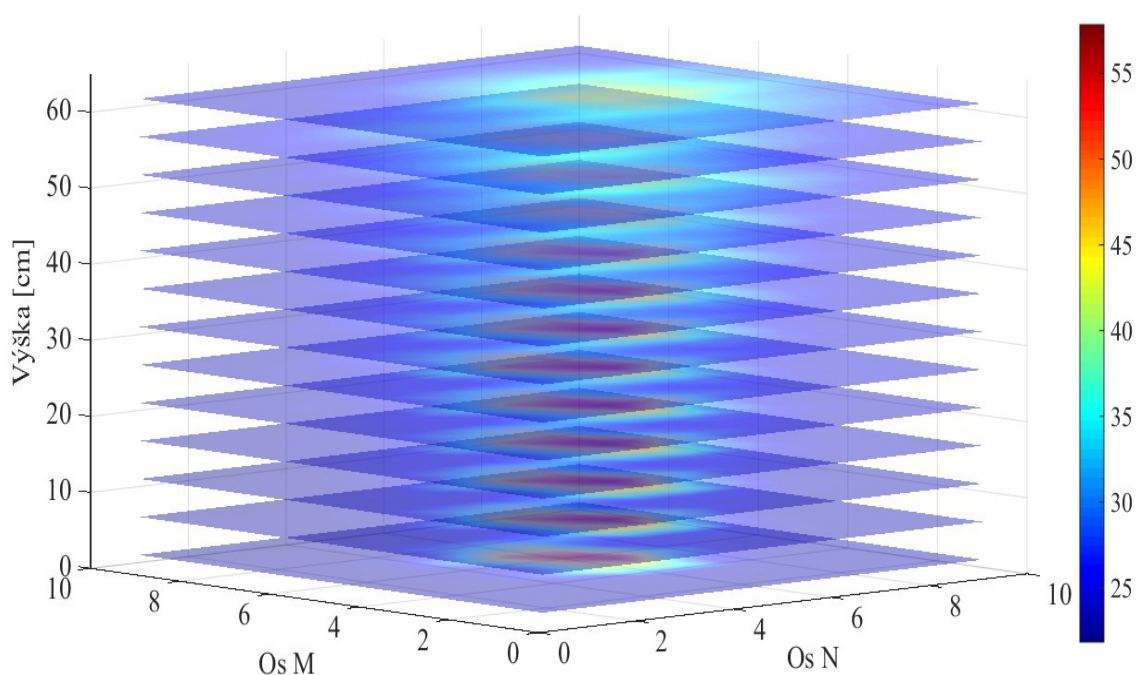


Obrázok 7.11: Porovnanie sietí šesťdesiat centimetrov nad ohrievačom primárna ochrana(vľavo)a sekundárna ochrana(vpravo).

V nasledujúcich dvoch 3D grafoch sú zobrazené merania teploty zo všetkých meraných výšok. Na obrázku 7.12 môžeme vidieť merania pomocou siete s primárnou ochranou a na obrázku 7.13 merania pomocou siete so sekundárnou ochranou.

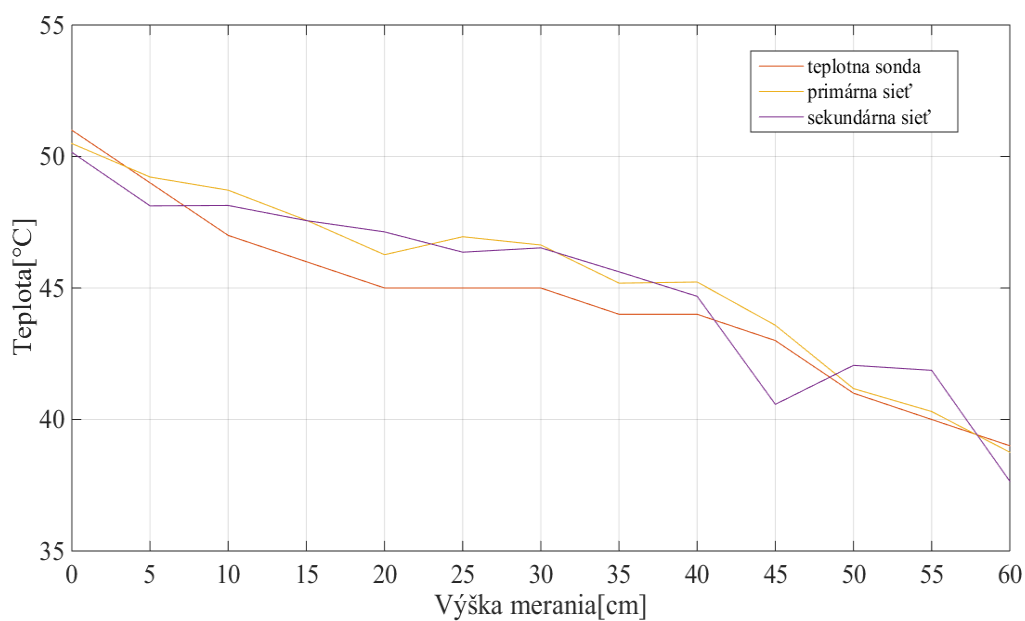


Obrázok 7.12: 3D graf s meraní teploty jednotlivých výšok s primárnou ochranou.



Obrázok 7.13: 3D graf s meraní teploty jednotlivých výšok so sekundárnou ochranou.

V poslednom grafe môžeme vidieť porovnanie hodnôt v jednotlivých výškach v rovnakom bode. Nameraných pomocou oboch meracích sietí a meracej sondy.



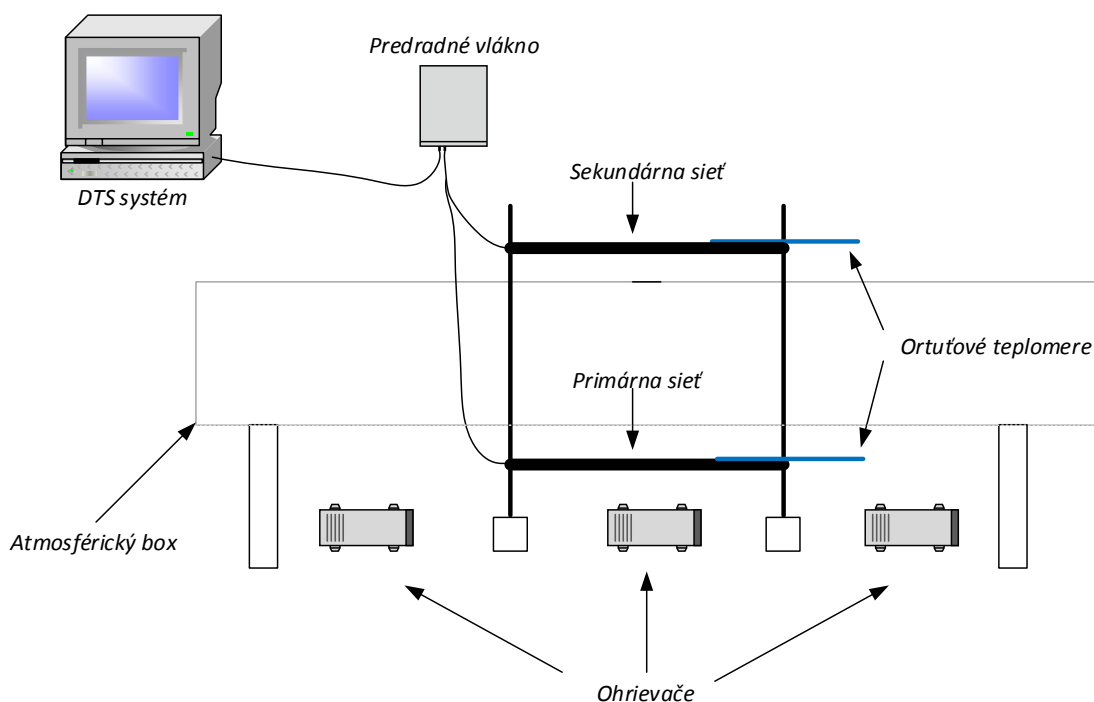
Obrázok 7.14: Porovnanie hodnôt v jednom meranom bode.

### Zhodnotenie merania

Meranie teploty pomocou ohrievača Empire CTH-5000 na oboch meraných sieťach môžeme vidieť na rôznych grafoch vyššie. Z grafov môžeme vidieť, že čím vyššie bola sieť umiestnená tým bola hodnota teploty menšia no zároveň nahriala väčšiu plochu. Ako môžeme vidieť na 2D a 3D grafoch podarilo sa zachovať aby teplý vzduch fúkal stále doprostred siete. Čo sa nepodarilo zabezpečiť v predchádzajúcom meraní s ohrievačom Solac TH 8325. Z grafu porovnania hodnôt v jednom meraní bode môžeme vidieť, že výsledky sú opäť nie úplne presne. To mohla spôsobiť nepresná kalibrácia DTS systému alebo DTS systém samotný, ktorý nie je v týchto teplotách úplne presný.

### 7.3 Meranie s atmosférickým boxom

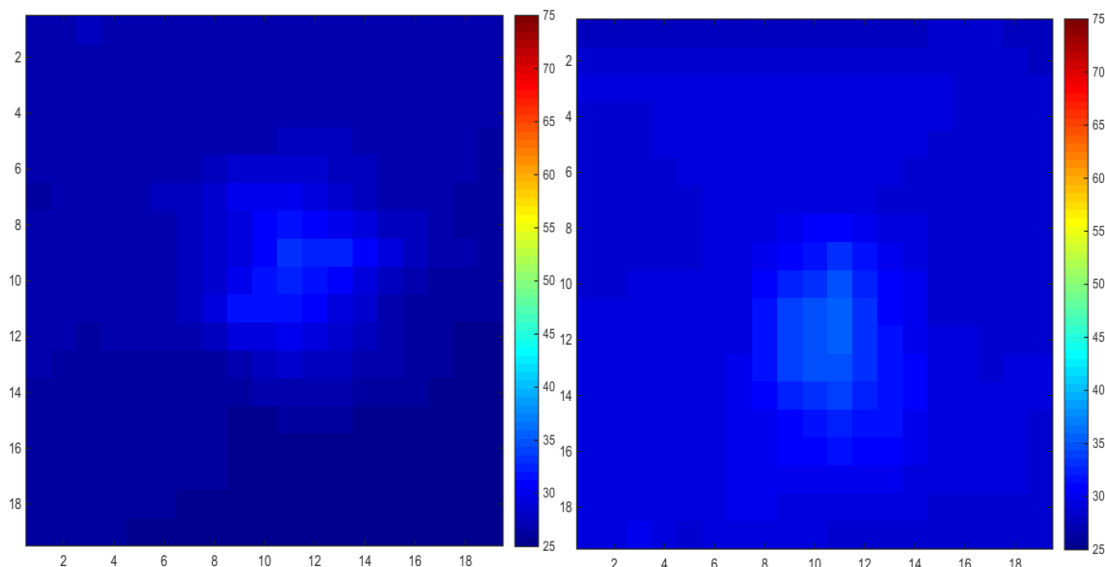
Ako ďalšie meranie bolo robené meranie s atmosférickým boxom podľa zadaných vstupných parametrov vedúceho bakalárskej práce. Pomocou meracích sietí som meral vstupnú a výstupnú charakteristiku teploty. Za systém DTS bolo zapojené predradné vlákno, ktorého parametre môžeme vidieť v Tabuľke 7.1. S predradným vláknom boli striedavo pripojované sieť so sekundárnou a sieť s primárnou ochranou. Atmosféricky box mal v hornej časti jeden výstupný otvor, ktorý podľa potreby meraní bol prázdny alebo mal namontovaný ventilátor. Nad ktorým bola umiestnená v strede otvoru sieť so sekundárnou ochranou. V spodnej časti boxu sa nachádzali tri ohrievače, ktoré boli používané k meraniu. Sieť s primárnou ochranou bola umiestnená v strede druhého ohrievača. Vstupnú a výstupnú teplotu som opäť kontroloval pomocou ortuťového teplomeru.



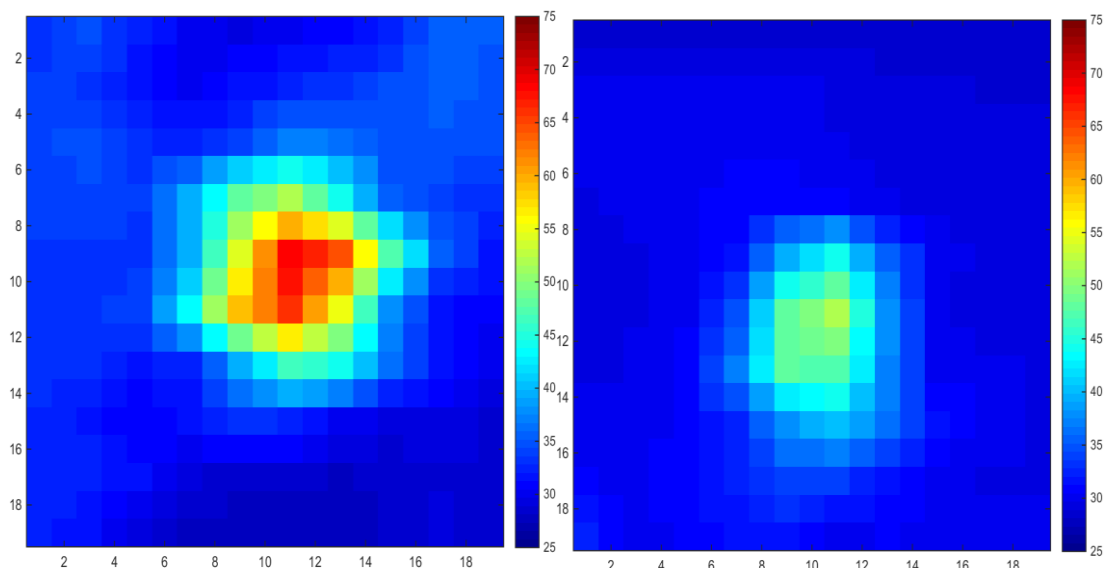
Obrázok 7.15: Schéma zapojenia merania v atmosférickom boxe.

### Meranie jedného ohrievača a voľného výstupu atmosférického boxu

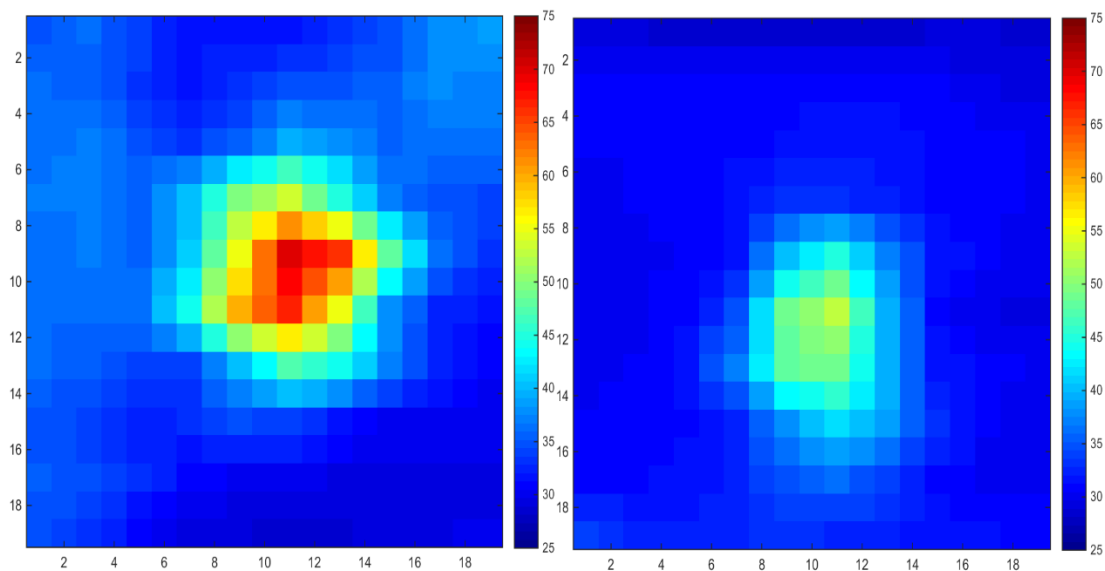
Toto meranie spočívalo v meraní jedného ohrievača Solac TH 8325, ktorý bol umiestnený v strede spodnej vstupnej siete. Výstupná diera boxu bola prázdna. Výsledky vstupu a výstupu môžeme vidieť na grafoch nižšie. Grafy sú zobrazené po tridsiatich sekundách, po piatich minútach a na konci merania po desiatich minútach. Pri porovnaní bola použitá interpolácia s hodnotou 1.



Obrázok 7.16: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po tridsiatich sekundách merania.

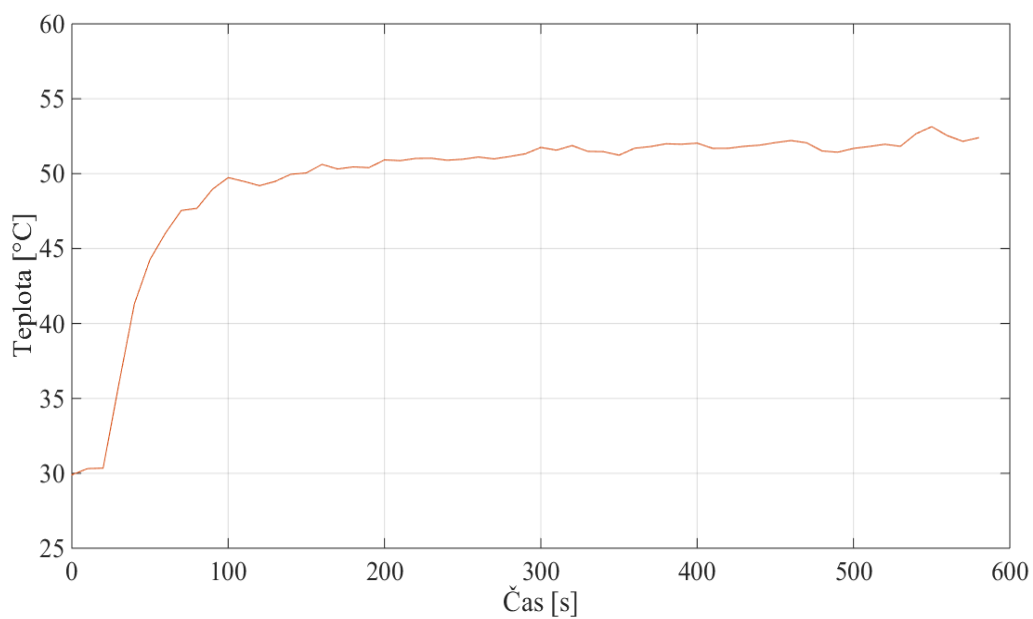


Obrázok 7.17: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po piatich minútach merania.



Obrázok 7.18: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po desiatich minútach merania.

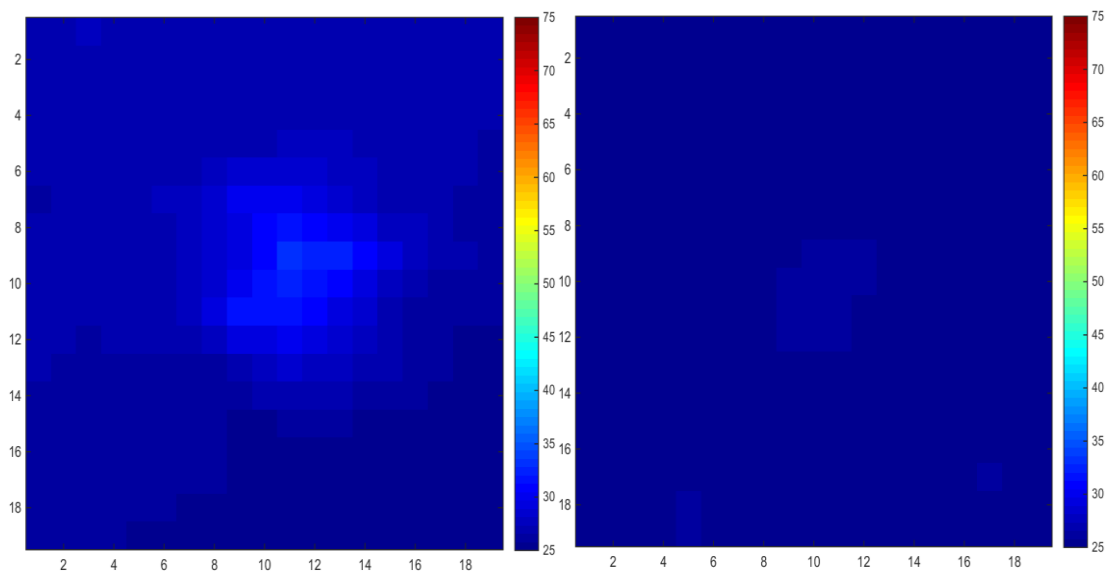
Ďalšom grafe môžeme vidieť rast teploty v čase nameranej na výstupe atmosférického boxu. Pri jednom ohrievači a voľnej diere na výstupe boxu. Na osi y je nanesená teplota v  $^{\circ}\text{C}$  a na osi x je vynesný čas merania v sekundách.



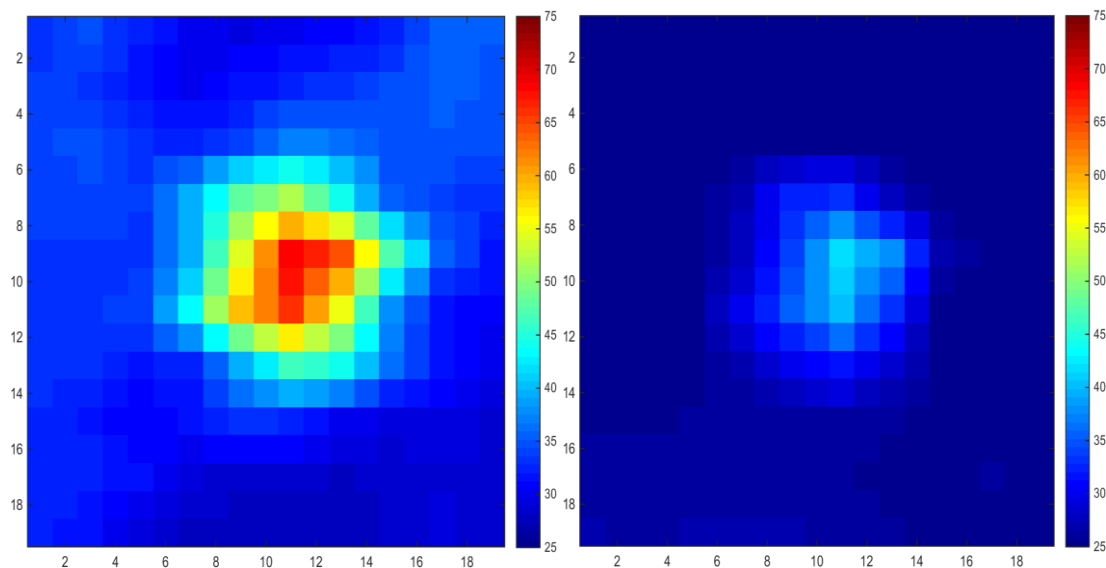
Obrázok 7.19: Graf zobrazujúci rast teploty v čase na výstupe boxu.

### Meranie jedného ohrievača s ventilátorom vo výstupe atmosférického boxu

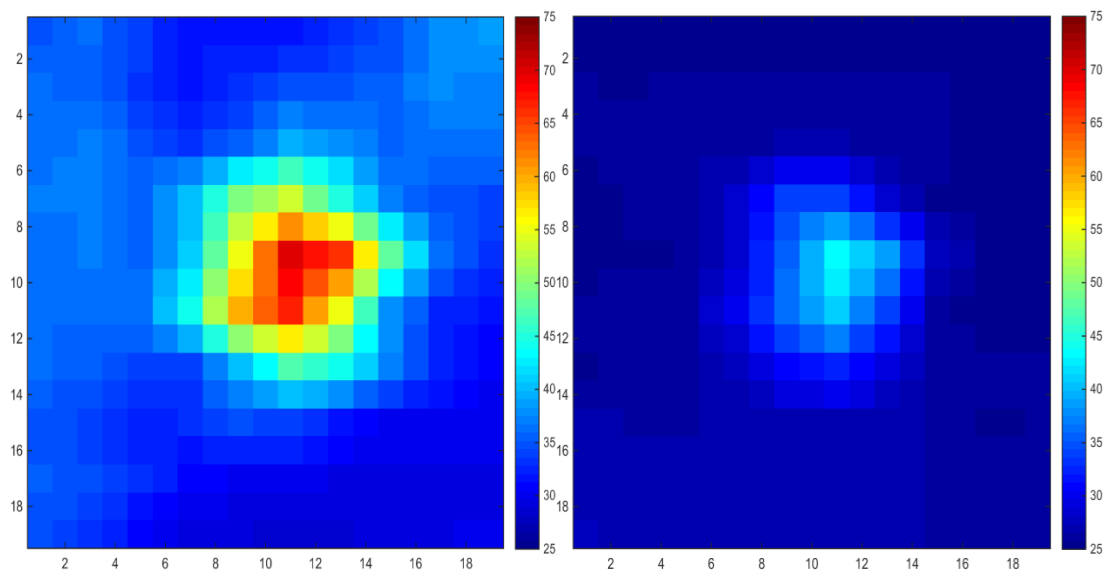
V tomto meraní sme opäť využili ohrievač Solac TH 8325, ktorý bol umiestnený v strede spodnej vstupnej siete. Vo výstupnej diere boxu bol namontovaný ventilátor. Výsledky vstupu a výstupu môžeme vidieť na grafoch nižšie. Grafy sú zobrazené po tridsiatich sekundách, po piatich minútach a na konci merania po desiatich minútach. Pri porovnaní bola použitá interpolácia s hodnotou 1.



Obrázok 7.20: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po tridsiatich sekundách merania.

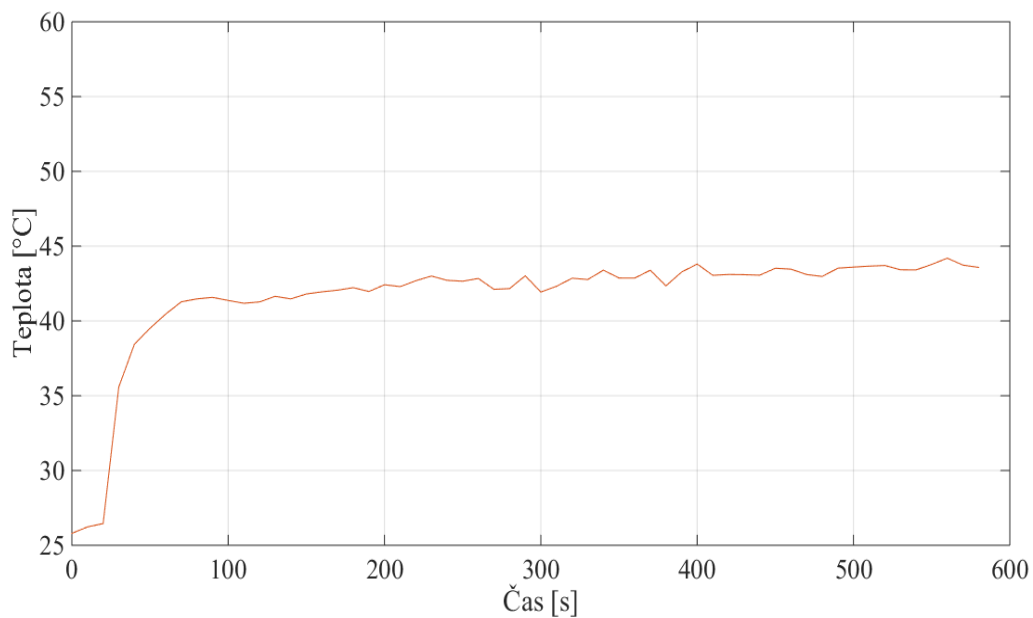


Obrázok 7.21: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po piatich minútach merania.



Obrázok 7.22: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po desiatich minútach merania.

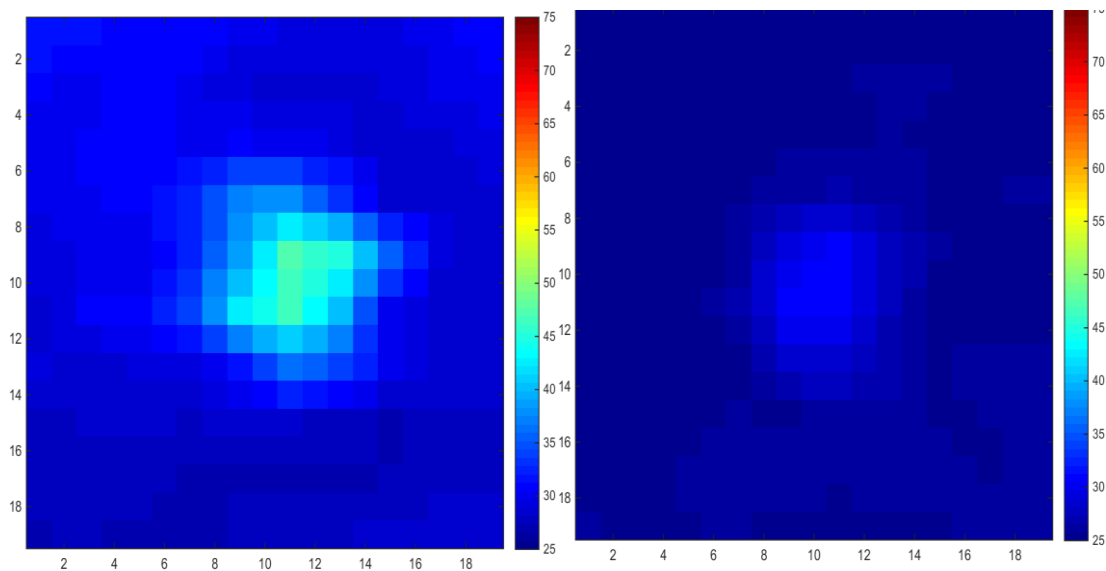
Ďalšom grafe môžeme vidieť rast teploty v čase nameranej na výstupe atmosférického boxu. Pri jednom ohrievači a ventilátore namontovanom vo výstupnej diere boxu. Na osi y je nanosená teplota v  $^{\circ}\text{C}$  a na osi x je vynesný čas merania v sekundách.



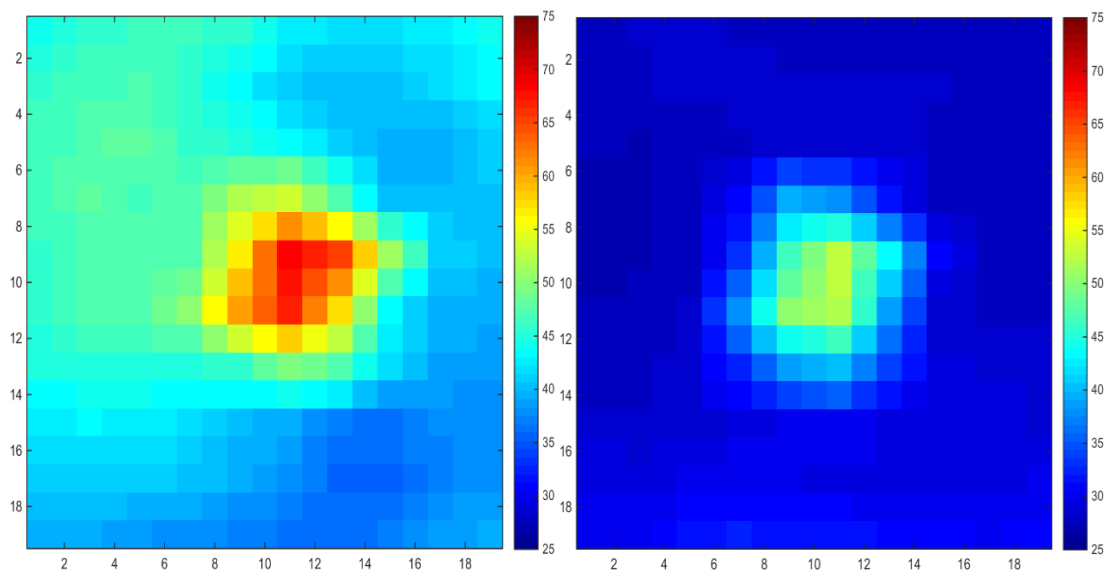
Obrázok 7.23: Graf zobrazujúci rast teploty v čase na výstupe boxu.

### Meranie troch ohrievačov a voľného výstupu atmosférického boxu

V tomto meraní som používal tri ohrievače dva Solac TH 8325 a jeden Empire CTH-5000 , ktoré boli rozmiestnené pod boxom. Pričom výstupná diera ostala prázdna. Výsledky vstupu a výstupu môžeme vidieť na grafoch nižšie. Grafy sú zobrazené po tridsiatich sekundách, po piatich minútach a na konci merania po desiatich minútach. Pri porovnaní bola použitá interpolácia s hodnotou 1.

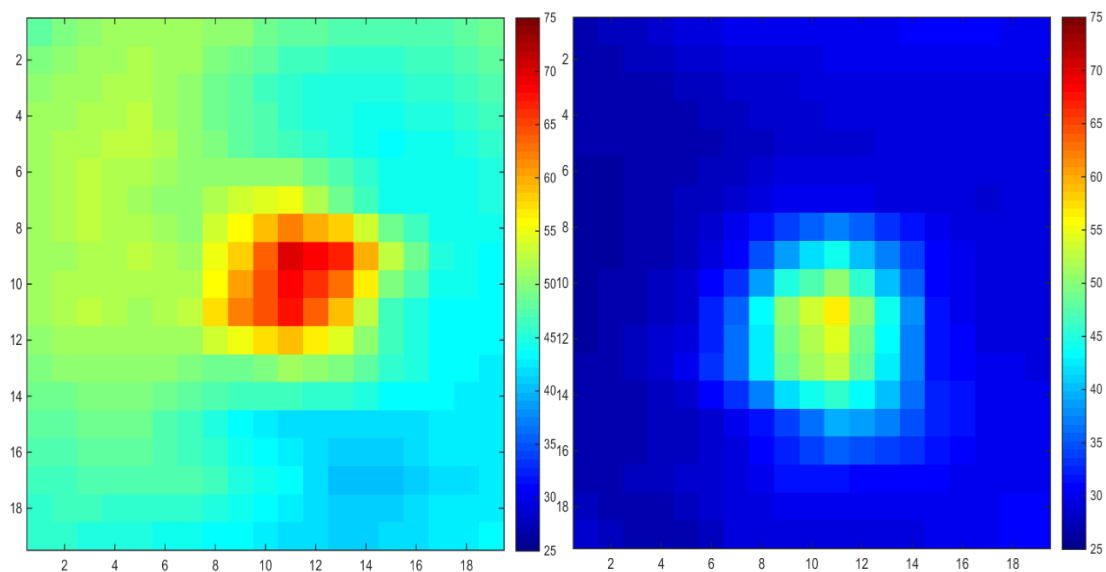


Obrázok 7.24: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po tridsiatich sekundách merania.



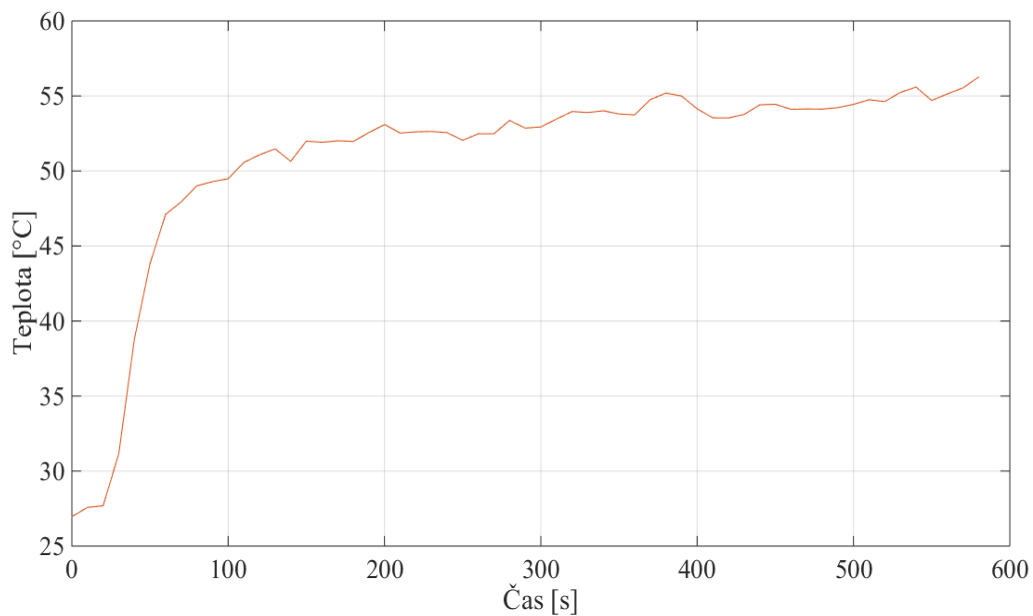
Obrázok 7.25: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po piatich minútach merania.





Obrázok 7.26: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po desiatich minútach merania.

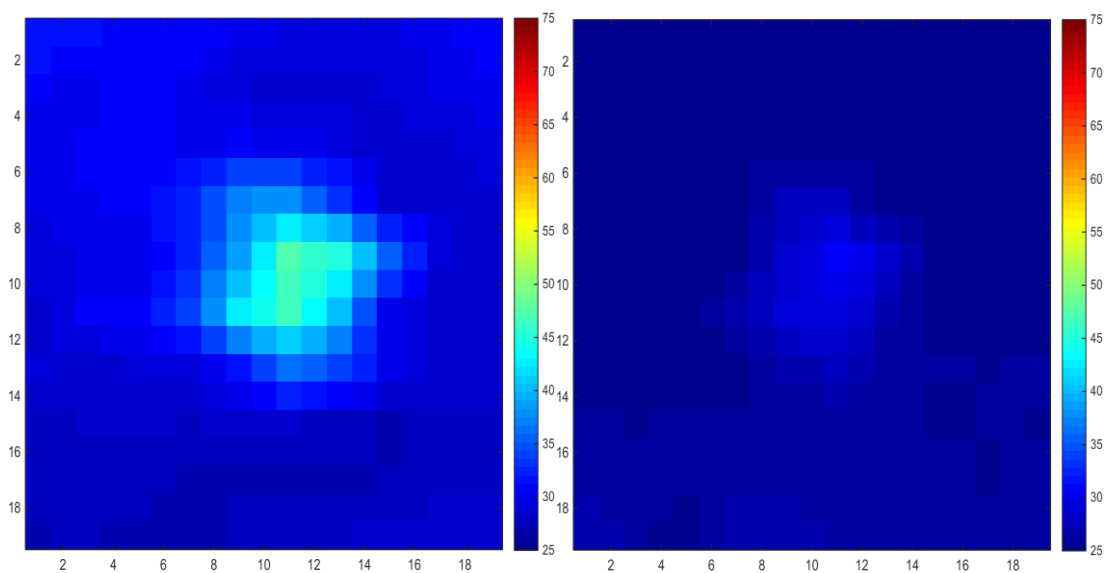
Ďalšom grafe môžeme vidieť rast teploty v čase nameranej na výstupe atmosférického boxu. Pri troch ohrievačoch a voľnej diere na výstupe boxu. Na osi y je nanosená teplota v °C a na osi x je vynesný čas merania v sekundách.



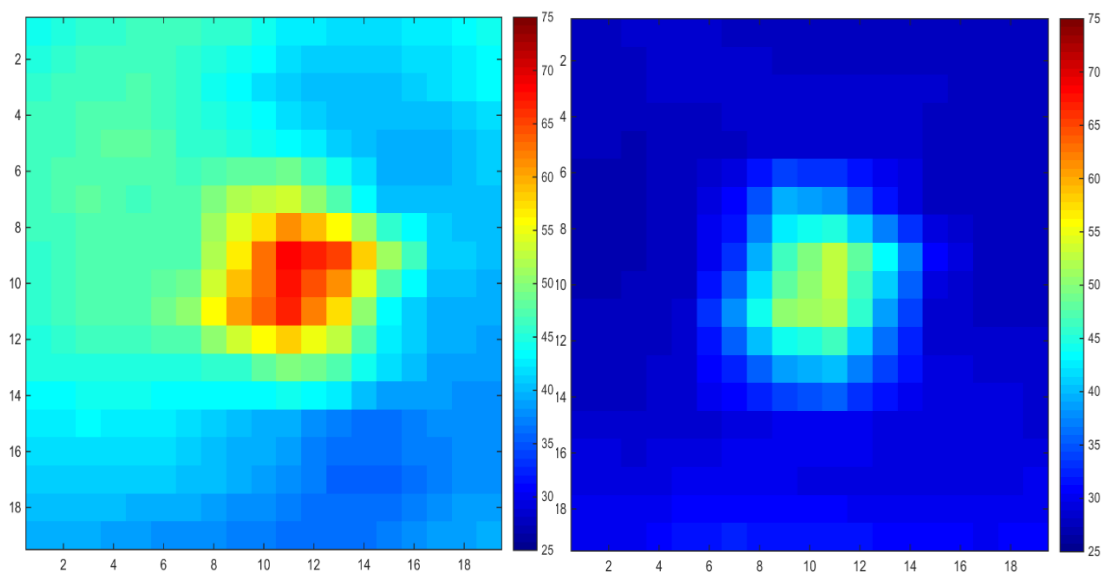
Obrázok 7.27: Graf zobrazujúci rast teploty v čase na výstupe boxu.

### Meranie troch ohrievačov s ventilátorom vo výstupe atmosférického boxu

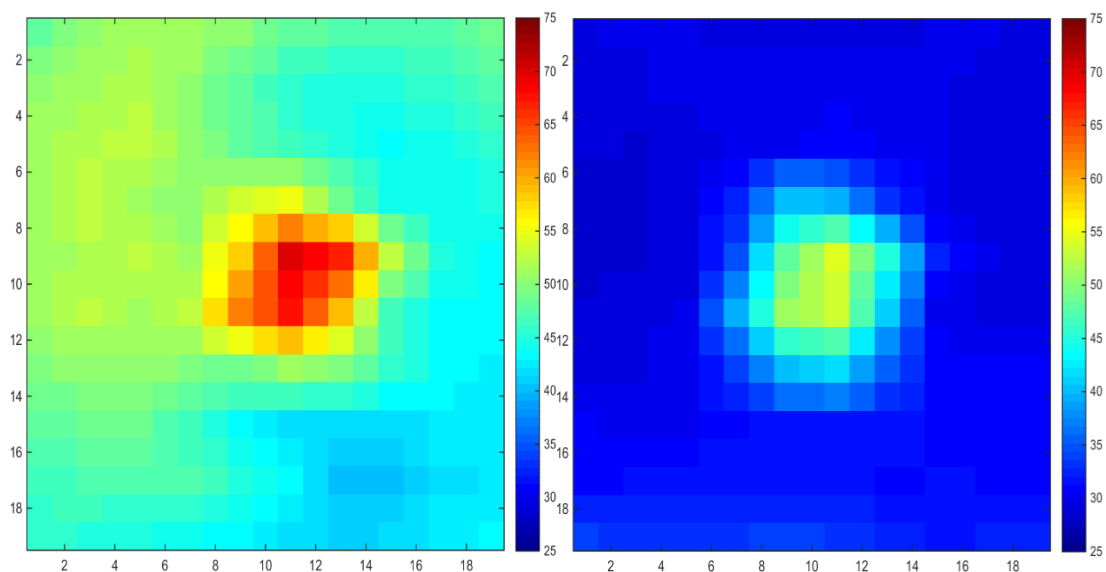
Toto meranie spočívalo v meraní troch ohrievačov dva Solac TH 8325 a jeden Empire CTH-5000, ktoré boli rozmiestnené pod boxom. Vo výstupnej diere bol umiestnený ventilátor. Výsledky vstupu a výstupu môžeme vidieť na grafoch nižšie. Grafy sú zobrazené po tridsiatich sekundách, po piatich minútach a na konci merania po desiatich minútach. Pri porovnaní bola použitá interpolácia s hodnotou 1.



Obrázok 7.28: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po tridsiatich sekundách merania.

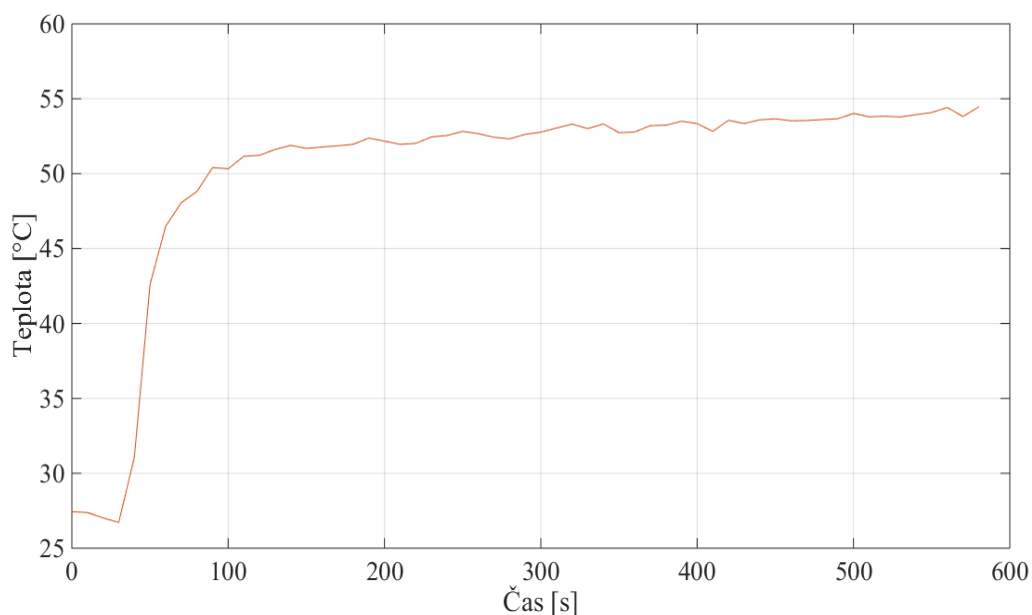


Obrázok 7.29: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po piatich minútach merania.



Obrázok 7.30: Porovnanie vstupnej (vľavo) a výstupnej (vpravo) teploty po desiatich minútach merania.

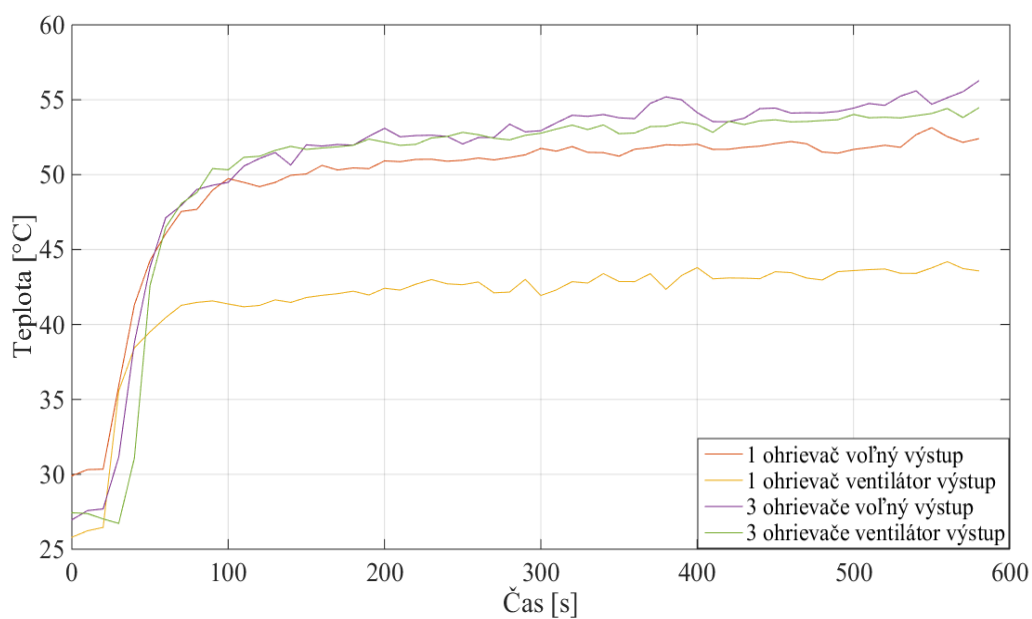
V nasledujúcom grafe môžeme vidieť rast teploty v čase nameranej na výstupe atmosférického boxu. Pri troch ohrievačoch a ventilátore namontovanom vo výstupnej diere boxu. Na osi y je nanesená teplota v °C a na osi x je vynesný čas merania v sekundách.



Obrázok 7.31: Graf zobrazujúci rast teploty v čase na výstupe boxu.

**Zhodnotenie meraní**

Z meraní vstupu a výstupu atmosférického boxu môžeme vidieť rozdiel v teplote na vstupe a výstupe boxu zobrazené v 2D grafoch. Tieto porovnania boli uskutočnené v časoch tridsať sekúnd po začatí merania, päť minút a desať minút po začatí merania. Ako môžeme v grafoch teplota na výstupe boxu nedosiahla vstupných teplôt ani po desiatich minútach merania. Do grafov boli vynesené maximálne hodnoty v jednotlivých časoch na výstupe atmosférického boxu. Na obrázku 7.32 môžeme vidieť porovnanie jednotlivých výstupov. Zaujímavé je že merania s ventilátorom na výstupe mali hodnotu teploty menšiu ako bez ventilátora na výstupe. Čo mohlo byť spôsobené rýchlymi otáčkami ventilátora, ktorý chladil vzduch na výstupe boxu.



Obrázok 7.32: Porovnanie jednotlivých výstupov.

## Záver

Zadaním tejto práce bolo meranie pomocou senzorického systému DTS. Boli k tomu vytvorené dve meracie siete. Jedna bola vyrobená z optického vlákna MM 50/125/245 s primárnou ochranou. Druhá bola vyrobená z optického vlákna LGBF-1BM-PK so sekundárnou ochranou. Z nameraných výsledkov pomocou OTDR prístroja bol zistený útlm oboch sietí a dĺžku trasy. Meranie pomocou tohto prístroja ukázalo, že sieť s primárnou ochranou má veľký útlm. Útlm bol spôsobený ohybmi a dvoma zvarmi na trase. Z čoho vyplýva, že sieť s primárnou ochranou mala síce menšie rozmery, ale jej výroba bola náročná. Preto je tento spôsob aplikovania vlákna s primárnou ochranou nevhodný pre metódu vinutia do krúžkov.

Ďalšou požiadavkou v tejto práci bolo vytvoriť aplikáciu v programovacom prostredí MATLAB, ktorá mala spracovávať a vyhodnocovať dáta namerané DTS systémom v reálnom čase. Vytvorená aplikácia spĺňa túto požiadavku a spracováva a vyhodnocuje namerané výsledky v 2D a 3D grafoch v reálnom čase. Najväčším problémom bolo naviazať komunikáciu pomocou LAN kábla so systémom DTS na ktorom bežal operačný systém Windows 2000. To sa podarilo a aplikácia dokáže spracovávať a vyhodnocovať namerané dáta v reálnom čase. V práci na aplikácii by sa dalo pokračovať aj naďalej, pričom by mohla byť aplikácia vylepšená responzivitou. Aplikácia by mohla naprogramovaná pre mobilné zariadenia, ktoré by vzdialené cez sieť pristupovali k DTS systému. Mohli by prehliadať a vyhodnocovať namerané dáta zo vzdialeného DTS systému.

Merania na oboch sieťach boli prevádzané na základe zadaných vstupných a výstupných parametrov vedúceho práce. Namerané dáta boli spracované a vynesene do jednotlivých grafov. Z výsledkov meraní môžeme vidieť že kalibrácia DTS systému sa podarila relatívne presne s miernymi odchýlkami. Merania s atmosférickými boxom ukázali, že merania s ventilátorom na výstupe mali hodnotu teploty menšiu ako bez ventilátora na výstupe. Čo mohlo byť spôsobené rýchlymi otáčkami ventilátora, ktorý chladil vzduch na výstupe boxu.

## Použitá literatura

- [1] KERSEY, D.A.; Danarige, A. Applications of Fiber-Optic Sensors [online]. March 1990, [cit. 2016-04-25], vol.13, no.13, 7s. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=52861>
- [2] GRATTAN, K. T. V., SUN, T.: Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators* 82, (2000), p.40-61.
- [3] BEJČEK, L.: Vláknová optika v řídicí a měřicí technice, FEKT VUT Brno, 2002
- [4] TURÁN, J. , S. Petřík: Optické vláknové senzory. Bratislava, Alfa, 1991
- [5] UDD, Eric. a William B. SPILLMAN. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 9780470126844.
- [6] BEJČEK, L. Optoelektronické snímače. Skripta VUT Brno, 2009
- [7] ZIYI, Z.; Xiaoyi, B. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of Polarization-OTDR system [online]. Canada, Ottawa: University of Ottawa, Physics Department, 2008, [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-16-14-10240>
- [8] VESELÝ, Ing. Ondřej, Ing. Jakub ČUBÍK a Ing. Stanislav KEPÁK. *Využití DTS v kabelové technice*[online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: [http://kabex.data.quonia.cz/Onas/DTS\\_kabely\\_Elektro\\_7\\_2012.pdf](http://kabex.data.quonia.cz/Onas/DTS_kabely_Elektro_7_2012.pdf)
- [9] RUFFIN, A. Boh: Stimulated Brillouin Scattering: An overview of measurements, Systems Impairments, and Amplications. NISTF - SOFM 2004
- [10] DADO, Milan. *Kapitoly z optiky: pre technikov*. 1. vyd. Žilina: EDIS, 1998. ISBN 80-7100-390-5. [online]. [cit.2016-04-25]. Dostupné z: [http://katalog.utc.sk/e-books/books/pdf/Dado\\_Milan\\_Kapitoly\\_z\\_optiky/kapitoly\\_z\\_optiky.pdf](http://katalog.utc.sk/e-books/books/pdf/Dado_Milan_Kapitoly_z_optiky/kapitoly_z_optiky.pdf)
- [11] MARŠÁLEK, L. Optická vlákna [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroniky a sdělovací techniky, 2006 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [12] MAŇÁK, R. Rayleighův a Mieův rozptyl I. Parhelium [online]. 3/2007, [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://ukazy.astro.cz/gal/Parhelium200703.pdf>
- [13] MATĚJKA, P.: Ramanova spektrometrie [online]. 2008, [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/anl/lach2/RAMAN.pdf>
- [14] AGRAWAL, G. P. *Nonlinear fiber optics*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, c1995. ISBN 0120451425.
- [15] SELKER, J., THÉVENAZ, L., HUWALD, H.: Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems 2006.

## **Zoznam príloh.**

Súčasťou tejto bakalárskej práce je CD/DVD médium, ktorého obsahom je:

- Aplikácia
- Dokument
- Merania
  - Namerané dáta
    - Primárna sieť
    - Sekundárna sieť
  - Fotografie z meraní
  - Grafy